

Grado en Ingeniería Mecánica
2018-2019

Trabajo Fin de Grado

“Dimensionado óptimo de un concentrador lineal beam-down”

Sebastián Taramona Fernández

Tutor:

Jesús Gómez-Hernández

Leganés, 2019



Esta obra se encuentra sujeta a la licencia Creative Commons **Reconocimiento - No Comercial - Sin Obra Derivada**

RESUMEN

Con el aumento de la demanda energética en los últimos años y la necesidad de realizar una transición hacia energías renovables, resulta de interés estudiar las posibles mejoras aplicables a las tecnologías existentes en la actualidad, con el fin de mejorar su eficiencia y hacerlas más rentables, accesibles y ventajosas.

Entre las fuentes de energía renovables se encuentra la solar térmica, que no ha sido de las más desarrolladas y presenta un buen potencial de crecimiento. En este trabajo de investigación se estudia la influencia de la discretización de un reflector hiperbólico secundario acoplado en una planta solar tipo Fresnel, analizando el número de espejos que componen la hipérbola, fundamentalmente para comprobar si es rentable, además de económicamente, en el ámbito del rendimiento óptico, al comparar los flujos de calor generados con los generados utilizando un espejo especial hiperbólico.

Para resolver los problemas planteados se utilizan dos métodos diferentes. El primero consiste en generar un código en MATLAB, que con conocer la localización geográfica, la geometría del campo y la hora solar sea capaz de determinar el flujo de calor que alcanza al colector final. El segundo método se basa en utilizar el software desarrollado por NREL denominado SolTrace, que es un programa especial para cálculos de instalaciones termosolares.

Los resultados obtenidos han sido mucho mejores de lo esperado, se encuentra que para una hipérbola compuesta por un número finito de espejos planos se obtienen mejores rendimientos que para un espejo hiperbólico ideal. Esto quiere decir que realizar un reflector hiperbólico secundario con espejos planos suficientes, puede resultar más beneficioso que utilizar un espejo hiperbólico especial.

Se puede concluir que la investigación realizada permite ver la incorporación de un sistema beam-down en una planta Fresnel como una inversión a tomar en cuenta, ya que permitiría incorporar un sistema de partículas como fluido calorportador con un bajo coste adicional.

Palabras clave: Energía Solar, Solar Térmica, Energías Renovables, Colectores Lineales Fresnel, Generación Eléctrica.

DEDICATORIA

En primer lugar a mi familia. Cerca o lejos, pero siempre presente.

En segundo lugar a mi tutor, por la confianza depositada desde el primer momento, y todas las posibilidades de desarrollo y crecimiento que han surgido gracias a ello.

Finalmente a mis amigos y compañeros en este viaje, en Venezuela y en España, por el apoyo y por marcar esta etapa que llega a su fin.

Gracias Totales.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1. Situación energética en España. | 1 |
| 1.2. Marco legal. | 2 |
| 1.3. Subvenciones. | 3 |
| 1.4. Objetivo del estudio | 3 |
| 1.5. Estructura del trabajo | 4 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 5 |
| 2.1. Fuentes de energía renovables. | 5 |
| 2.2. Energía solar. | 6 |
| 2.3. Situación actual de la energía termosolar. | 7 |
| 2.4. Incorporación de partículas como fluido calorportador. | 14 |
| 2.5. Colectores lineales Fresnel. | 15 |
| 2.6. Ciclo Rankine de potencia. | 18 |
| 2.7. Geometría solar | 19 |
| 2.8. Rendimiento óptico del campo solar. | 22 |
| 2.9. FRESDEMO. | 23 |
| 3. TECNOLOGÍA A DESARROLLAR | 25 |
| 3.1. Hipérbola. | 26 |
| 3.2. Factor R cuadrado (R^2) | 27 |
| 3.3. Modelo final | 28 |
| 4. METODOLOGÍA | 29 |
| 4.1. Modelo de MATLAB. | 29 |
| 4.2. Validación en SolTrace. | 32 |
| 5. RESULTADOS | 37 |
| 5.1. Influencia del número de rayos | 37 |
| 5.2. Influencia del número de espejos | 38 |
| 5.3. Influencia de la excentricidad | 42 |
| 5.4. Evolución del rendimiento óptico en el día | 44 |

| | |
|--|----|
| 5.5. Análisis de costes | 45 |
| 6. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES. | 49 |
| 6.1. Conclusiones | 49 |
| 6.2. Discusiones. | 51 |
| 7. BIBLIOGRAFÍA | 52 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Evolución de la demanda anual. Fuente: [1] | 1 |
| 1.2 | Evolución de la potencia instalada [MW]. Fuente: [1] | 1 |
| 1.3 | Distribución de la generación. Fuente: [1] | 2 |
| 2.1 | Relaciones entre la tierra y el sol. Fuente: [6, p5] | 6 |
| 2.2 | Radiación solar directa en la ubicación estudiada. Fuente: [7] | 7 |
| 2.3 | Evolución de la potencia solar térmica. Fuente: [1] | 7 |
| 2.4 | Demanda y generación termosolar mensual. Fuente: [1] | 8 |
| 2.5 | Esquema de una planta termosolar PTC. Fuente: [8] | 8 |
| 2.6 | Diagrama de una planta termosolar PTC. Fuente: [8] | 9 |
| 2.7 | Central PTC Andasol III. Fuente: [10] | 9 |
| 2.8 | Esquema de una planta termosolar de torre. Fuente: [8] | 10 |
| 2.9 | Diagrama de una planta termosolar de torre. Fuente: [8] | 10 |
| 2.10 | Central de torre Khi Solar One. Fuente: [12] | 11 |
| 2.11 | Esquema de un colector Stirling. Fuente: [8] | 11 |
| 2.12 | Concentradores de disco Stirling | 12 |
| 2.13 | Esquema de una planta LFC. Fuente: [8] | 12 |
| 2.14 | Central de Puerto Errado II. Fuente: [8] | 13 |
| 2.15 | Diagrama de una planta LFC. Fuente: [8] | 13 |
| 2.16 | Partículas en caída libre. Fuente: [16, p44] | 14 |
| 2.17 | Sistema de obstrucción. Fuente: [16, p45] | 14 |
| 2.18 | Modelos de campos LFC | 16 |
| 2.19 | Modelos de colectores | 16 |
| 2.20 | Ciclo Rankine de potencia | 18 |
| 2.21 | Trayectoria aparente del sol. Fuente: [24] | 19 |
| 2.22 | Ángulos solares. Fuente: [25] | 21 |
| 2.23 | Pérdida del coseno. Fuente: [27] | 22 |
| 2.24 | Sombras y bloqueos. Fuente: Propia | 23 |

| | | |
|------|--|----|
| 2.25 | Factor de desborde. Fuente: Propia | 23 |
| 2.26 | Central LFC FRESEMO. Fuente: [28, p64] | 24 |
| 3.1 | LFC con sistema beam-down. Fuente: [29, p2] | 25 |
| 3.2 | Definición hipérbola | 26 |
| 3.3 | Variación de la curva con la excentricidad. Fuente: Propia | 26 |
| 3.4 | Hipérbola ideal e hipérbola discretizada. Fuente: Propia | 27 |
| 3.5 | Campo LFC con beam-down estudiado. Fuente: Propia | 28 |
| 4.1 | Representación del problema en MATLAB. Fuente: Propia | 30 |
| 4.2 | Reflexión de rayos solares | 30 |
| 4.3 | Definición de factor de desborde. Fuente: Propia | 31 |
| 4.4 | Propiedades definidas en SolTrace | 32 |
| 4.5 | Geometría de cada espejo obtenida en MATLAB. Fuente: Propia . . . | 34 |
| 4.6 | Introducción de geometría en SolTrace. Fuente: Propia | 34 |
| 4.7 | Diagrama de la instalación en SolTrace. Fuente: Propia | 35 |
| 4.8 | Flujo de calor en el colector. Fuente: Propia | 36 |
| 5.1 | Influencia del número de rayos utilizado en los resultados. Fuente: Propia | 37 |
| 5.2 | Resultados con 4 espejos. Fuente: Propia | 38 |
| 5.3 | Resultados con 8 espejos. Fuente: Propia | 38 |
| 5.4 | Resultados con 10 espejos. Fuente: Propia | 39 |
| 5.5 | Influencia del número de divisiones en la hipérbola. Fuente: Propia . . | 40 |
| 5.6 | Influencia del número de divisiones sobre el factor de desborde. Fuen- te: Propia | 41 |
| 5.7 | Influencia de la excentricidad sobre los resultados. Fuente: Propia . . | 42 |
| 5.8 | Detalle de las variaciones con la excentricidad. Fuente: Propia | 43 |
| 5.9 | Evolución de los factores del rendimiento óptico. Fuente: Propia . . . | 44 |
| 5.10 | Distribución de costes en un LFC de alta efectividad. Fuente: [41, p1343] | 45 |
| 5.11 | Variación de costes con el número de espejos. Fuente: Propia | 46 |
| 5.12 | Detalle de la variación de costes con el número de espejos. Fuente: Propia | 47 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Comparación PTC y Fresnel con coste equivalente. Fuente: [21, p7] | 16 |
| 2.2 | Comparación de concentradores lineales. Fuente: [22, p569] | 17 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Situación energética en España

Una vez superada la crisis económica que comenzó en el año 2008 ha existido un aumento de la demanda energética en el país, observando esta tendencia desde 2014 y llegando a una demanda anual de 253 TWh en el año 2017 [1].

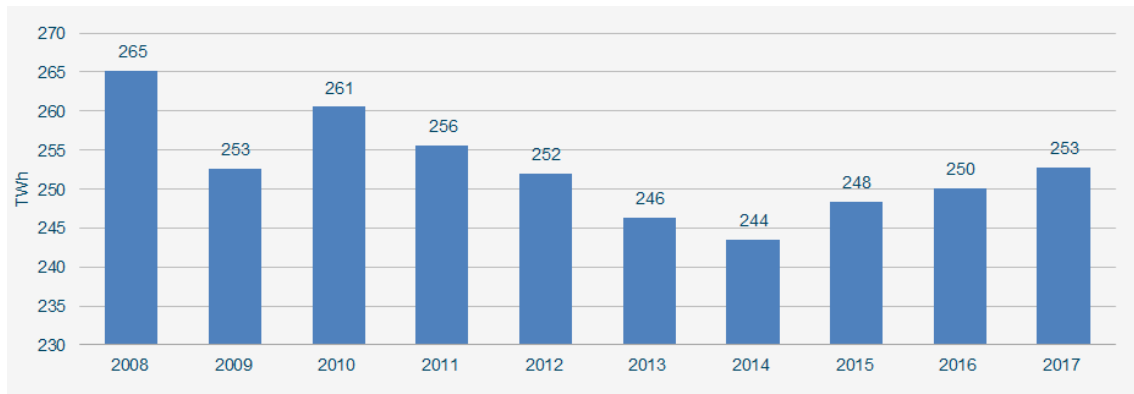


Fig. 1.1. Evolución de la demanda anual. Fuente: [1]

Por otro lado, en la última década ha existido una preferencia por la generación de energía eléctrica por medio de fuentes renovables, existiendo una gran cantidad de subvenciones por parte del estado para el desarrollo de tecnologías en este entorno, sobre todo las relacionadas con la energía eólica y la solar fotovoltaica. Así en el último reporte de la situación energética proporcionado por Red Eléctrica de España, del año 2017, se observa la tendencia creciente de las tecnologías subvencionadas, y en menor medida la energía solar térmica y el resto de renovables. De esta manera para el año 2017 un 32.1 % de la generación eléctrica de España es de origen renovable.

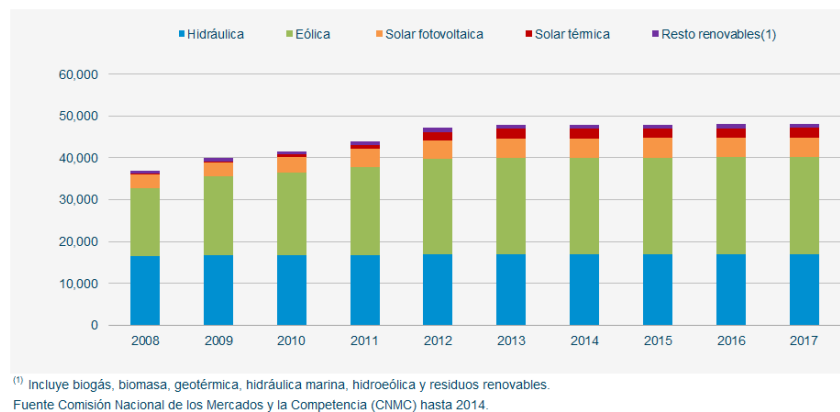
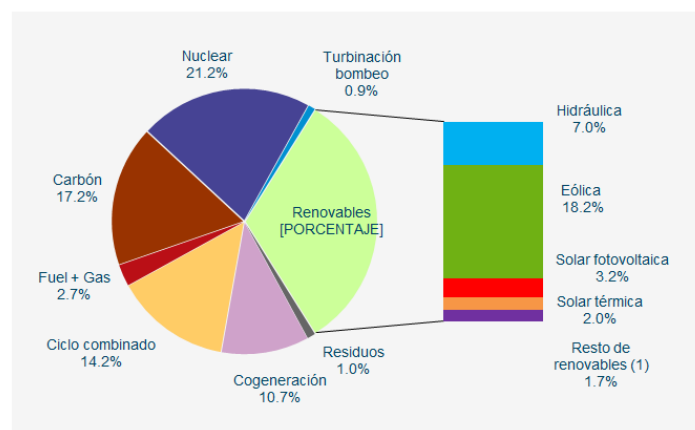


Fig. 1.2. Evolución de la potencia instalada [MW]. Fuente: [1]



⁽¹⁾ Incluye biogás, biomasa, geotérmica, hidráulica marina, hidroeléctrica y residuos renovables.

Fig. 1.3. Distribución de la generación. Fuente: [1]

Todas estas medidas surgen por la participación de España en diversos tratados internacionales.

El protocolo de Kioto de 1997 es un acuerdo internacional cuyo objetivo principal es reducir la emisión de seis gases que influyen en el calentamiento global, entre ellos el gas metano y el dióxido de carbono, la meta era reducir al menos un 5 % de las emisiones entre 2008 y 2012 comparadas con las de 1990. En España la meta propuesta fue la de limitar el aumento de las emisiones hasta un 15 %, meta que no fue lograda con éxito ya que en 2008 las emisiones aumentaron en un 42 %. Este protocolo entró en vigor en 2005 [2].

En segundo lugar se encuentra el acuerdo de París de 2016 que se plantea como una continuación del protocolo de Kioto una vez este deje de estar en vigencia. Este acuerdo también plantea medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y su principal fin es limitar el aumento de la temperatura global a 1.5 °C con respecto a los niveles preindustriales [3].

Finalmente, a causa del acuerdo de París, la Unión Europea plantea una estrategia a largo plazo que busca la neutralidad climática invirtiendo en soluciones realistas para el año 2050. Entre las principales iniciativas se tienen la de invertir en tecnologías industriales limpias, apoyo estructural a las regiones de consumo intensivo de carbón, o la iniciativa sobre energía limpia para las islas [4].

1.2. Marco legal

La producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, co-generación y residuos se ve regulada por el Real Decreto 413/2014. Esta legislación regula los derechos y obligaciones de estas instalaciones, tomando en cuenta los contratos, la documentación, su participación en el mercado, los aspectos retributivos, las inspecciones de las instalaciones, procedimientos administrativos, etc.

Otro Real Decreto-ley que resulta de interés es el 15/2018 que trata las medidas urgentes para la transición energética. Este decreto modifica las tarifas de acceso a la red eléctrica, la legislación previa de autoconsumo y la integración de energías renovables.

1.3. Subvenciones

En el contexto actual la legislación del ámbito de las subvenciones a energías renovables se enfoca en la reducción de los costes de las diversas tecnologías. En 2012 se aprueba el Real Decreto-ley 1/2012 que suspende los incentivos económicos de proyectos de instalación de plantas de generación que utilizan fuentes renovables, cogeneración y residuos. Posteriormente la ley 15/2012 establece nuevos impuestos para el sector eléctrico cuyo fin es reducir su déficit, en esta ley figura un impuesto para la producción de energía eléctrica que afecta tanto la generación como la incorporación a la red. A continuación el Real Decreto 413/2014 regula la producción de energía eléctrica de origen renovable, cogeneración y residuos, en este se indica la retribución tanto a la operación como a la inversión para el periodo regulatorio que culmina en 2016.

Debido a la poca seguridad que estaba brindando el mercado de energías renovables, pero aun queriendo alcanzar los objetivos propuestos para 2020 y 2030, en 2016 se cambia el sistema por uno de subastas. Estas subastas funcionan con la oferta de un descuento a las inversiones del capital del proyecto sobre unos valores estandarizados, los proyectos que oferten mayores descuentos que generen menos impacto de sobrecoste en el sistema terminan ganando la subasta; sin embargo este mecanismo actualmente ofrece unos ingresos menores a los proporcionados por el mercado.

La primera subasta celebrada en 2016 terminó con una concesión de subvención de 200 MW para biomasa y 500 MW para eólica. En la segunda subasta de 3000 MW ofertados, 2979 MW terminaron en eólica, 1 MW en fotovoltaica y 20 MW en el resto de tecnologías. Finalmente en la última subasta realizada en 2017, de 5000 MW ofertado 3900 MW se destinaron a fotovoltaica y 1100 MW a eólica [5].

1.4. Objetivo del estudio

El principal objetivo de este trabajo de investigación es el de estudiar el funcionamiento de una planta termosolar de tipo Fresnel incorporando un reflector secundario beam-down, realizando un modelo en MATLAB que simule el funcionamiento del sistema para luego validar los resultados utilizando SolTrace. Se busca determinar la eficiencia de la instalación y los costes adicionales que conllevaría la implementación de esta tecnología.

Este proyecto está centrado en el análisis del reflector hiperbólico secundario, estudiando el flujo de calor que alcanza al colector utilizando una hipérbola ideal y luego utilizando una hipérbola discretizada; es decir, generando la forma de la hipérbola con un número definido de espejos planos y comparando cómo es el flujo de calor generado con un cierto número de estos espejos con respecto al obtenido con una hipérbola ideal. De este modo se busca generar una disminución de los costes de la instalación: en primer lugar al colocar el colector a la altura de los espejos se elimina la necesidad de elevar las partículas que funcionan como fluido calorportador, y en segundo lugar al utilizar espejos planos en vez de un espejo especial hiperbólico, siendo el coste por metro cuadrado de los primeros mucho menor que el de los segundos, se reduce en gran medida el coste adicional de incorporar un receptor secundario en la instalación.

1.5. Estructura del trabajo

El trabajo realizado consta de 5 partes:

- Marco teórico: se presentan los conocimientos teóricos necesarios para llevar a cabo y comprender el trabajo. Desde las fuentes de energía y las tecnologías que permiten su transformación, hasta los conocimientos matemáticos y estadísticos para llevar a cabo las modificaciones y los modelos de solución.
- Tecnología a desarrollar: tomando en cuenta la situación actual de la tecnología se presentan las modificaciones propuestas, que permiten obtener la configuración final del campo solar que será estudiado en el proyecto de investigación.
- Metodología: expone los métodos empleados para obtener las soluciones del problema. Se presentan los distintos programas utilizados y los procedimientos que se llevan a cabo en ellos para poder obtener los resultados.
- Resultados: se presentan todos los resultados obtenidos, analizando los efectos de los diversos parámetros que influyen sobre ellos. Además se realiza un análisis económico de la instalación y de la influencia de los resultados obtenidos sobre la misma.
- Conclusiones y discusiones: se cierra el estudio realizado resaltando los resultados más importantes y su influencia en la tecnología actual, también se presentan posibles estudios futuros para complementar los resultados obtenidos en este trabajo de investigación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Fuentes de energía renovables

Entre las energías renovables presentes en el sistema de generación de España se encuentran:

- Eólica: utiliza la energía cinética presente en el viento y la transforma en energía eléctrica mediante el giro de las palas de los aerogeneradores. Es la que ha presentado mayor crecimiento en la última década y la que actualmente cubre el mayor porcentaje generado entre las opciones de energías renovables.
- Hidráulica: transforma la energía potencial presente en un cuerpo de agua represada en energía eléctrica. Debe existir una diferencia de alturas hidráulicas para generar un caudal de agua, que al recorrer una turbina genera el movimiento de la misma, y ésta al estar acoplada a un transformador, genera electricidad. Este campo no ha tenido crecimiento en la última década.
- Solar fotovoltaica: transforma directamente la radiación solar en energía eléctrica, por medio de células fotovoltaicas. Este método ha tenido un crecimiento debido a la disminución de precios de los paneles fotovoltaicos y al aumento de su rendimiento, pero presenta inconvenientes en cuanto al almacenamiento de la energía generada.
- Solar térmica: utiliza la radiación solar directa concentrada puntual o linealmente, que funciona como fuente de calor en un ciclo de turbina de vapor. Este sector ha tenido un crecimiento en los últimos años pero en menor escala, debido a los costes de los espejos necesarios para la concentración de energía solar y su bajo rendimiento. Este método permite el almacenamiento del calor captado para utilizarlo cuando sea necesario generar energía eléctrica.
- Otras fuentes: incluye biogás obtenido de la biodegradación anaeróbica de materia orgánica, biomasa que es materia de origen vegetal o animal que se puede utilizar para generar energía (excluyendo combustibles fósiles), geotermia que utiliza el calor presente en la corteza terrestre e hidráulica marina que aprovecha oleajes y mareas, entre las más importantes.

2.2. Energía solar

El sol es una esfera de gas caliente que se encuentra en promedio a 1.5×10^8 Km de la tierra, con 1.39×10^6 Km de diámetro y una temperatura de cuerpo negro de 5777 K, que se comporta como un reactor de fusión que combina hidrógeno para generar helio, produciendo energía a partir de este proceso. Esta energía por unidad de tiempo, recibida en un área unitaria perpendicular a la dirección de la radiación, a la distancia media entre la tierra y sol, se conoce como constante solar [6].

$$G_{on} = 1367 * (1 + 0,033\cos(\frac{360}{365}n))[W/m^2]$$

Donde n es el día del año considerado (1 de enero será el día 1...).

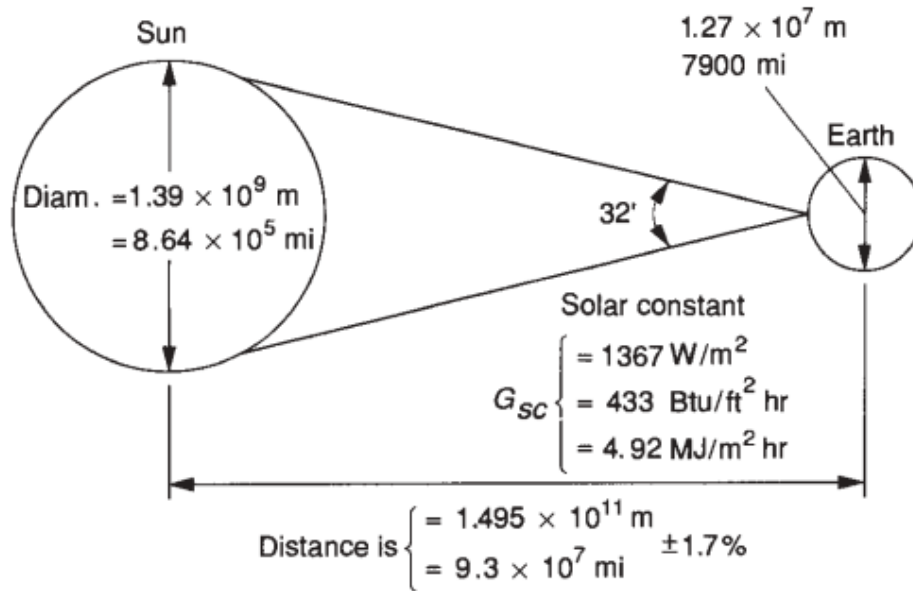


Fig. 2.1. Relaciones entre la tierra y el sol. Fuente: [6, p5]

De esta energía total que es recibida en la superficie terrestre, en plantas termo-solares de concentración solo interesa la fracción de la radiación que no es dispersada por la atmósfera, conocida como radiación directa o DNI. Este valor se puede considerar como una constante igual a 1000 W/m^2 , obtenida utilizando los datos proporcionados por la Comisión Europea de Energía, en la localización de Calasparra en Murcia, cercana a la ubicación de la central solar de Puerto Errado II [7].

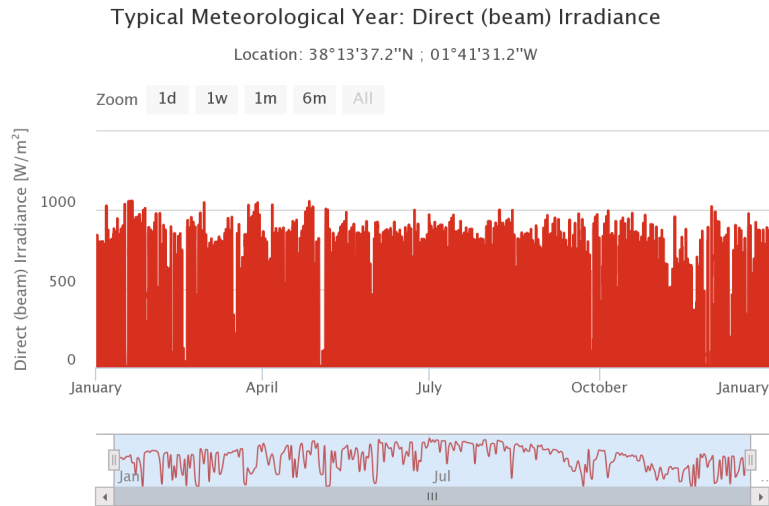


Fig. 2.2. Radiación solar directa en la ubicación estudiada. Fuente: [7]

2.3. Situación actual de la energía termosolar

El sector energético que se procede a estudiar con detalle es el de la energía solar térmica, ya que tiene un gran potencial de crecimiento y de combinación con nuevas tecnologías, que permiten la posibilidad de mejorar los rendimientos de estas instalaciones y disminuir sus costes.

En menos de una década el porcentaje de la energía anual generada en España utilizando tecnología solar térmica ha aumentado de un 0 % a poco más de un 2 %, lo que equivale a un aumento cercano a 5500 GWh eléctricos generados anualmente en la actualidad [1].

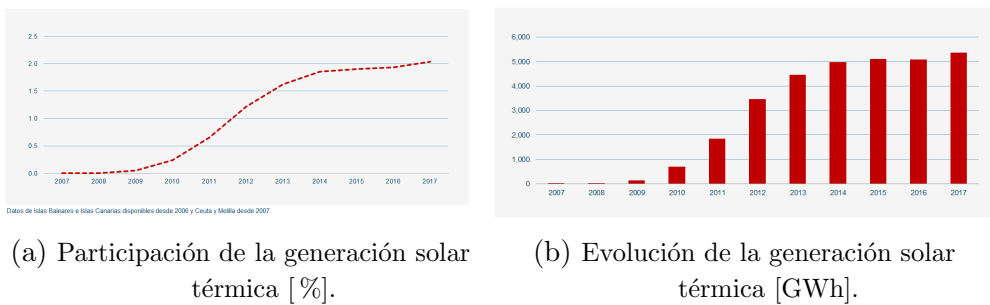
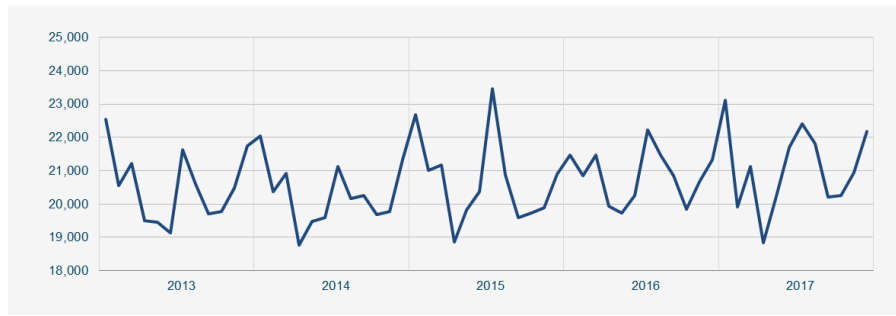
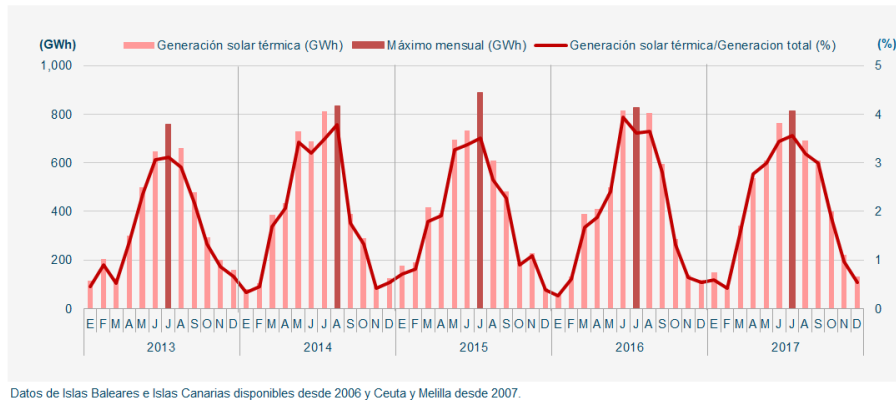


Fig. 2.3. Evolución de la potencia solar térmica. Fuente: [1]

La otra gran ventaja que presenta el sector solar, tanto fotovoltaico como termosolar, es que las máximas generaciones, que ocurren en los meses de verano donde hay mayor radiación solar y más horas de sol al día, coinciden con uno de los dos picos de demanda energética del año.



(a) Evolución mensual de la demanda energética [GWh].



Datos de Islas Baleares e Islas Canarias disponibles desde 2006 y Ceuta y Melilla desde 2007.

(b) Participación de la generación solar térmica [GWh].

Fig. 2.4. Demanda y generación termosolar mensual. Fuente: [1]

En el sector de energía termosolar existen 4 grandes configuraciones de plantas generadoras de potencia:

- Colectores parabólicos (PTC): utiliza espejos cilindro-parabólicos con un colector acoplado y aceite térmico como fluido calorportador, siendo este capaz de alcanzar los 393 °C. Estos espejos forman largas filas y concentran el calor linealmente a lo largo de toda su longitud, aumentando la temperatura del fluido calorportador que circula a través del colector.

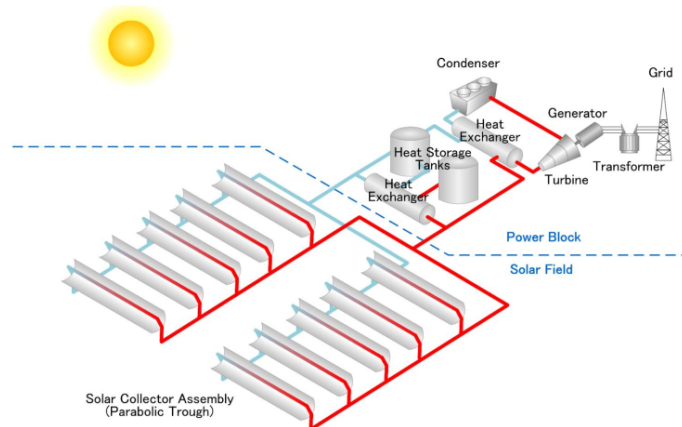


Fig. 2.5. Esquema de una planta termosolar PTC. Fuente: [8]

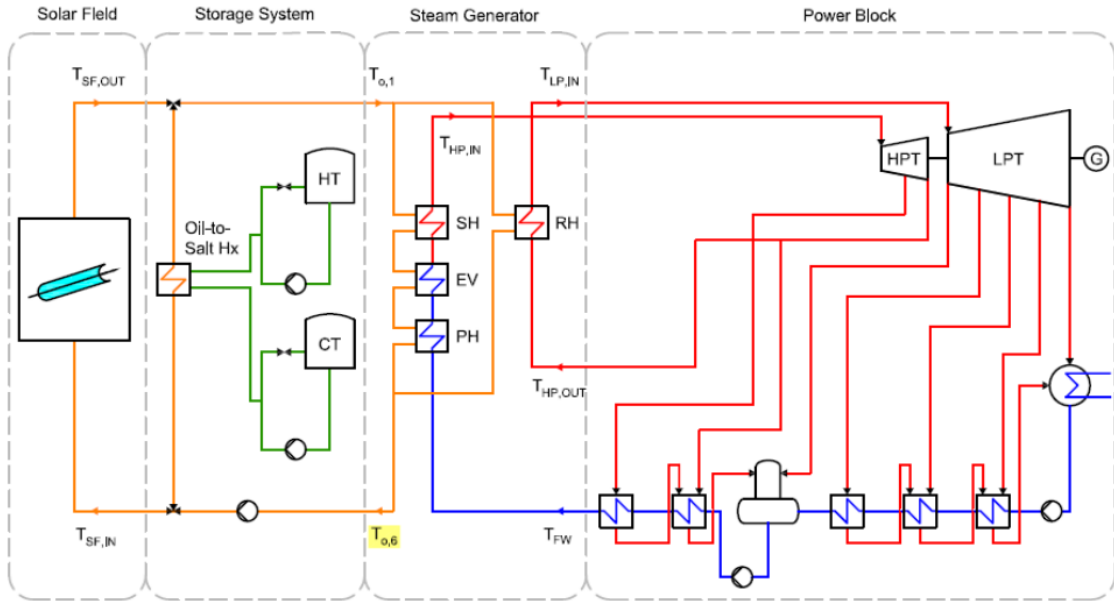


Fig. 2.6. Diagrama de una planta termosolar PTC. Fuente: [8]

La potencia nominal de un sistema PTC ronda los 50 MW, por ejemplo en Andasol III se genera esta potencia en poco menos de 2 Km cuadrados [9]. Otro caso de interés es el de Manchasol I que también presenta una potencia neta de 50 MW con unos heliostatos de aproximadamente 6 metros de apertura, un rendimiento óptico cercano al 70 % y un coste estimado de entre 250 y 300 €/m², incluyendo el conjunto de heliostatos y el receptor. Otra peculiaridad de Manchasol I es que cuenta con un sistema de almacenamiento que funciona con sales fundidas y permite guardar el calor por aproximadamente 7 horas y media [8].



Fig. 2.7. Central PTC Andasol III. Fuente: [10]

- Centrales de torre: constan de un gran campo de heliostatos con seguimiento en dos ejes que concentran la radiación en un punto específico en el cual se encuentra el receptor. Este receptor está ubicado en lo alto de una torre y a través de él circula el fluido calorportador. Utiliza sales fundidas que son capaces de llegar a los $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ sin degradarse. El campo solar presenta un rendimiento aproximado de 55% que se ve afectado en gran manera por la separación entre los heliostatos y el receptor, que eleva considerablemente el factor de desborde. Sin embargo la mayor temperatura del fluido calorportador hace que globalmente el rendimiento de este tipo de centrales sea superior a otras centrales de concentración.

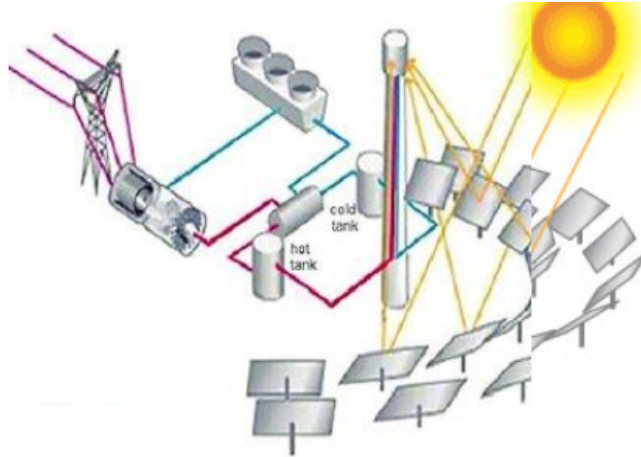


Fig. 2.8. Esquema de una planta termosolar de torre. Fuente: [8]

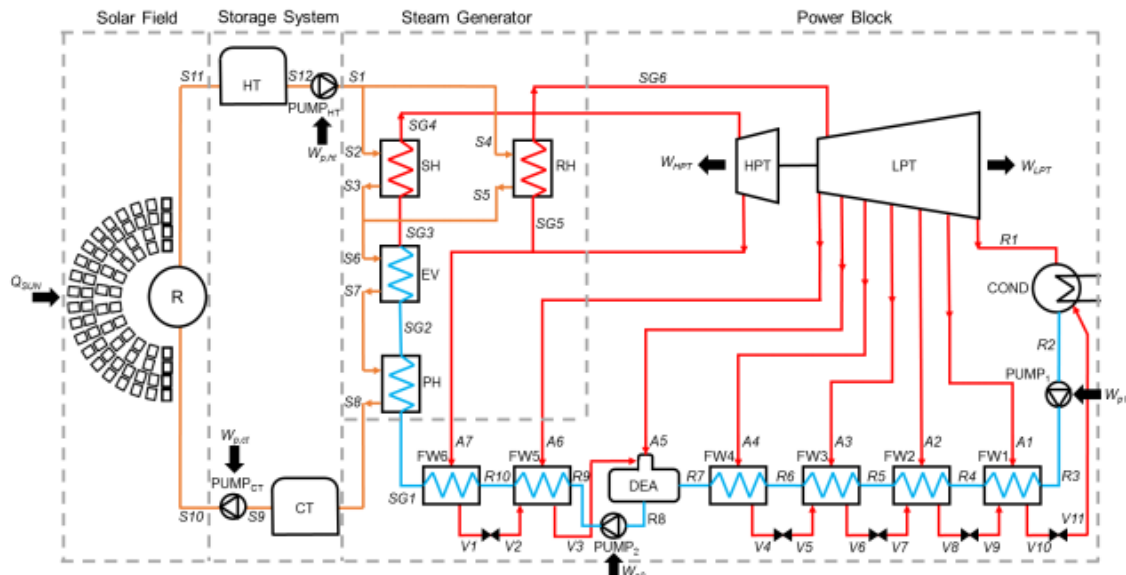


Fig. 2.9. Diagrama de una planta termosolar de torre. Fuente: [8]

La central presentada en las siguientes imágenes es la Khi Solar One ubicada en Sudáfrica, produce aproximadamente 50 MW y es la primera central termosolar construida en el continente africano [11]. Otro caso interesante es el de Crescent Dunes en Estados Unidos, que genera una potencia neta de 110 MW y cuenta con un sistema de almacenamiento capaz de conservar el calor durante 10 horas [8].



Fig. 2.10. Central de torre Khi Solar One. Fuente: [12]

- Disco Stirling: utilizan un reflector de forma paraboloide con un motor especial acoplado, denominado motor Stirling, que transforma directamente la energía solar térmica concentrada en su foco en energía eléctrica. Esta tecnología requiere un seguimiento en dos ejes, su fluido calorportador es el aire y no cuenta con sistema de almacenamiento, lo cual es una gran desventaja, ya que si no está recibiendo radiación no produce energía eléctrica.

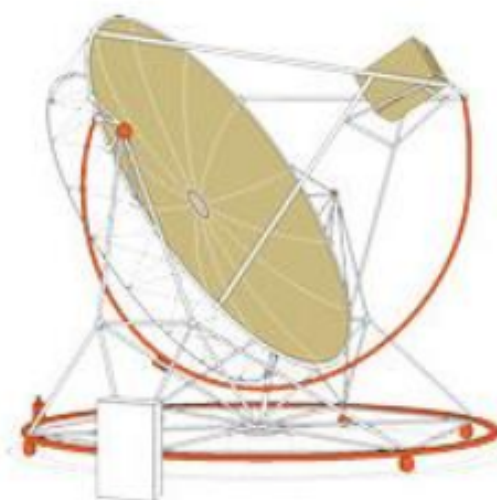
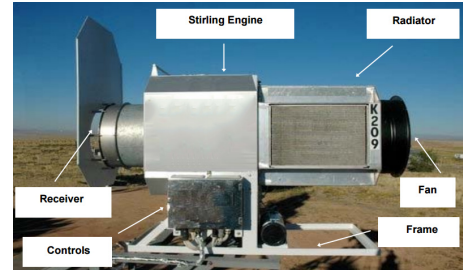


Fig. 2.11. Esquema de un colector Stirling. Fuente: [8]

El receptor se ubica en el foco del concentrador y está acoplado con el motor Stirling que aprovecha esta radiación concentrada [8]. Normalmente cada disco produce una media de 10 KW con un rendimiento cercano al 20 %, y se suelen colocar formando conjuntos que generan entre 5 y 25 MW de potencia [13].



(a) Concentrador Stirling. Fuente: [14]



(b) Motor Stirling. Fuente: [15]

Fig. 2.12. Concentradores de disco Stirling

- Colectores lineales Fresnel (LFC): utilizan espejos planos para concentrar linealmente la radiación solar en un colector a gran altura. Esta tecnología utiliza espejos con seguimiento en un solo eje, por lo que los costes de la instalación son menores que en el resto de configuraciones, ya que un seguimiento en dos ejes es más costoso que un seguimiento en un solo eje, y los espejos planos son más económicos que los curvos. Utilizan agua como fluido calor-transportador lo que hace difícil acoplar el sistema del colector con un sistema de almacenamiento de calor. El rendimiento del campo de heliostatos ronda el 60 % y presentan un coste aproximado de 120 €/m² [8].

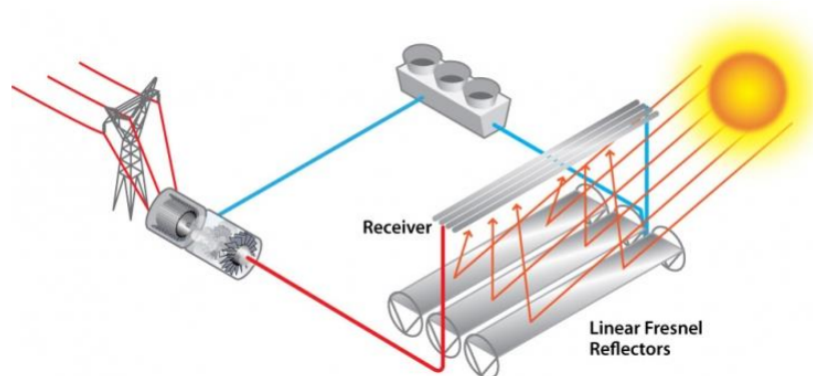


Fig. 2.13. Esquema de una planta LFC. Fuente: [8]

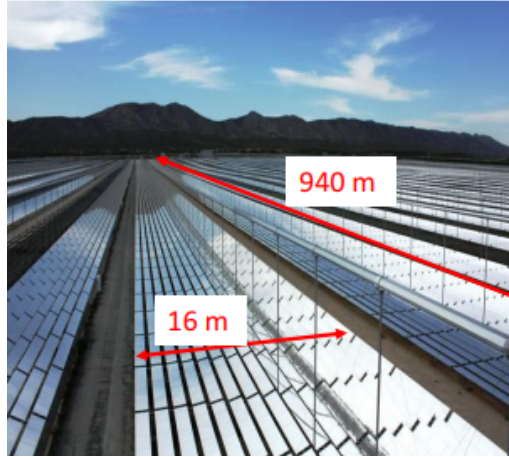


Fig. 2.14. Central de Puerto Errado II. Fuente: [8]

Por ejemplo la central de Puerto Errado II ubicada en Murcia, España, cuenta con una potencia neta de 30 MW. El agua que circula por esta instalación entra al campo de heliostatos con $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ y sale con $270\text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatura mucho menor que la obtenida en una planta PTC.

Con la tecnología LFC es posible obtener potencias similares a los PTC, con peores rendimientos pero con mejor utilización del espacio ocupado por el campo solar, estas comparaciones serán explicadas con mayor detalle más adelante.

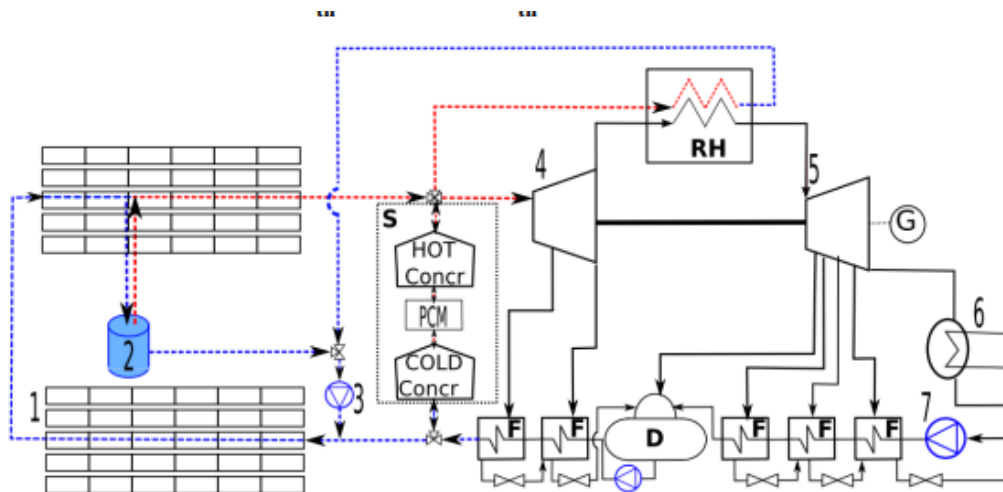


Fig. 2.15. Diagrama de una planta LFC. Fuente: [8]

2.4. Incorporación de partículas como fluido calorportador

Uno de los principales desafíos para el futuro es el de mejorar la potencia generada por las instalaciones termosolares. Una de las modificaciones que se ha desarrollado en los últimos años, con su paulatina incorporación en el mercado, es la de cambiar el fluido calorportador a partículas que permiten alcanzar mayores temperaturas sin degradarse, llegando hasta más de 1000 °C, y pudiendo bajar hasta menos de 200 °C sin riesgo alguno de congelación. [16, p43]

Existen 5 modelos diferentes que permiten el calentamiento de las partículas. [16, pp43-46]

- Receptores de partículas de caída libre: se elevan las partículas en una torre y se dejan caer formando una delgada cortina. Se hace un agujero en la torre para que pueda incidir la radiación concentrada por los espejos en las partículas que caen. El aumento de la temperatura de las partículas depende de la radiación incidente y del flujo másico de las mismas. Este modelo presenta varios problemas, como la variación en flujos másicos e irradiación, la pérdida de partículas a través de la apertura y el desgaste en las paredes del receptor debido a las altas temperaturas.



Fig. 2.16. Partículas en caída libre. Fuente: [16, p44]

- Receptores con obstrucción: sigue el mismo principio que el receptor de partículas de caída libre, pero con la incorporación de diversas obstrucciones en el flujo, que permiten aumentar el tiempo de residencia de las partículas en la apertura subiendo consigo la temperatura final alcanzada. Este método tiene el problema inherente del sobrecalentamiento de las obstrucciones, que pueden devenir en el atasco de las partículas y la reducción total del flujo másico en puntos específicos.

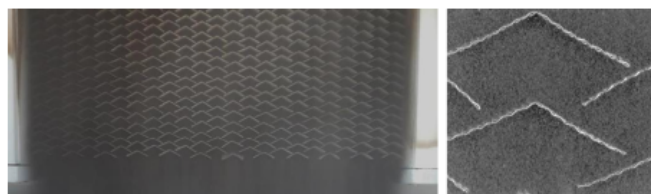


Fig. 2.17. Sistema de obstrucción. Fuente: [16, p45]

- Tambor rotatorio o receptores centrífugos: cuentan con un receptor giratorio en el cuál se introducen las partículas, y la fuerza centrífuga generada por el giro del mismo hace que ellas se desplacen por las paredes mientras son irradiadas por los rayos concentrados, que entran por un extremo del tambor que se mantiene abierto. Entre las dificultades presentes en este método está la de mantener un flujo másico que sea suficiente y constante, además de los costes adicionales del giro del receptor y las pérdidas de partículas a alta temperatura por el extremo abierto del tambor.
- Lecho fluidizado: se utiliza aire comprimido para fluidizar un lecho de partículas. Este método presenta la complejidad adicional de obtener los flujos másicos deseados debido a la forma en que se fluidiza el lecho de partículas.
- Impulsado por gravedad a través de recintos: las partículas descienden debido a la acción de la fuerza gravitatoria a través de recintos cerrados que son calentados utilizando la radiación solar concentrada.

La mayoría de estos métodos requieren el proceso de elevar las partículas a gran altura para dejarlas caer, proceso que es bastante complejo y costoso. Utilizando el software “System Advisor Model” desarrollado por NREL que permite obtener presupuestos aproximados para distintas configuraciones de plantas termosolares, es posible determinar los costes de construcción de una planta termosolar de torre. De este modo extrapolando de estos datos se determina que el coste de la torre y el receptor se encuentra alrededor de los 110.5 millones de euros, que equivale a un precio aproximado de 192 €/m².

2.5. Colectores lineales Fresnel

Entre las tecnologías utilizadas en las plantas termosolares de concentración, se encuentran los LFC. Este sistema cuenta con una serie de espejos planos reflectores a una altura cercana al suelo y un colector ubicado a mayor altura, sobre el cuál los espejos reflectores concentran la radiación directa incidente de manera lineal. En una ubicación no tropical, se utiliza una orientación Norte-Sur, lo que implica un seguimiento de los espejos en el eje Este-Oeste. Este tipo de planta permite aumentar la proporción de concentración sin aumentar las cargas de viento sobre el sistema, además de ser el tipo de planta termosolar de concentración que requiere menor inversión económica, dado que los espejos planos son mucho más baratos que los curvos [17].

Existen diversas configuraciones de los LFC, en función de la disposición de los colectores y los espejos [18], así como diversos tipos de colectores que han sido estudiados de manera más profunda, buscando mejorar rendimientos y tener una distribución del calor concentrado más homogénea [19, 20].

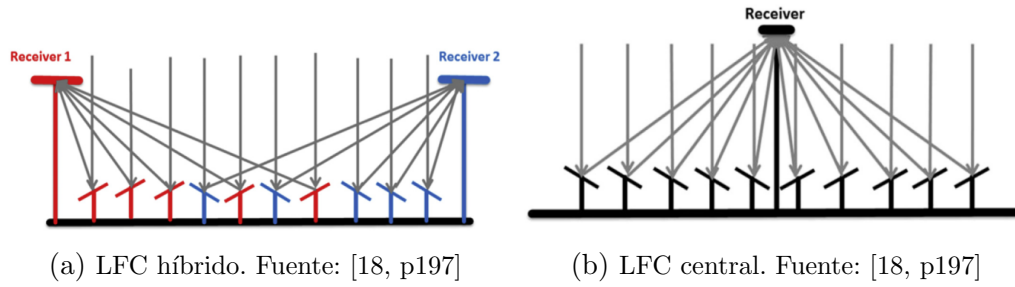


Fig. 2.18. Modelos de campos LFC

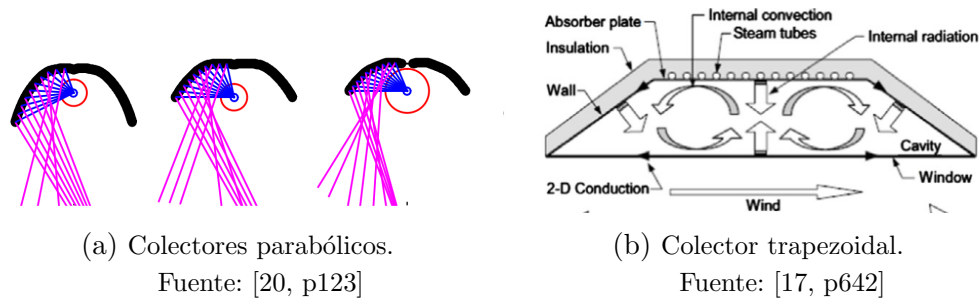


Fig. 2.19. Modelos de colectores

La tecnología LFC ha sido comparada con la PTC [21], presentando resultados similares, salvo en los parámetros de costes, terreno necesario para el campo solar, y rendimiento térmico y óptico.

| ECOSTAR | | | | |
|--|---------|--------|---------|--------|
| | | | COLSIM | |
| | PTC ref | LFC eq | PTC ref | LFC eq |
| Coste del campo solar [%] | 100 | 55 | 100 | 53 |
| Tamaño del campo solar [Km ²] | 273 | 373 | 265 | 369 |
| Terreno necesario [Km ²] | 955 | 746 | 927 | 738 |
| Generación anual neta [GWh] | 114 | 97 | 107 | 90 |
| Rendimiento óptico anual [%] | 58 | 43 | 57 | 43 |
| Rendimiento térmico anual [%] | 85 | 76 | 84 | 74 % |
| Rendimiento anual del bloque de potencia [%] | 34 | 32 | 33 | 32 |
| Rendimiento neto anual [%] | 15 | 9.3 | 15.5 | 8.7 |

TABLA 2.1. COMPARACIÓN PTC Y FRESNEL CON COSTE EQUIVALENTE. FUENTE: [21, P7]

| | Potencia unit. [MW] | Concen- tración | Rend. solar máximo | Rend. solar anual | Factor de capacidad | Temp. de salida [°C] | Terreno por MWh/año [m ²] |
|-----|---------------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|---|
| PTC | 10-200 | 70-80 | 21 | 17-18 | 25-70 | 300-550 | 6-8 |
| LFC | 10-200 | 25-100 | 22 | 9-11 | 25-70 | 250-500 | 4-6 |

TABLA 2.2. COMPARACIÓN DE CONCENTRADORES
LINEALES. FUENTE: [22, P569]

Se observa en las tablas que la generación eléctrica generada por los LFC es aproximadamente un 15 % inferior que la energía generada por los PTC y presentan un rendimiento ligeramente inferior, alrededor de un 5 % por debajo de los PTC. Sin embargo al comparar los costes (que en un LFC son cercanos al 50 % de los de un PTC) y la proporción de campo solar que se puede obtener en un terreno de dimensiones determinadas (que es superior en un campo LFC) se determina que a pesar de las desventajas presentadas frente a un PTC, utilizar un LFC es una opción más económica y que genera resultados aceptables.

El campo termosolar va acoplado con un ciclo de potencia de turbina de vapor, además de incorporar tanques de almacenamiento para el fluido calorportador y los intercambiadores de calor necesarios. Todo esto sustituye la función de la caldera en el ciclo Rankine.

La planta termosolar consta de 4 zonas claramente definidas que pueden apreciarse en las figuras 2.6 y 2.9:

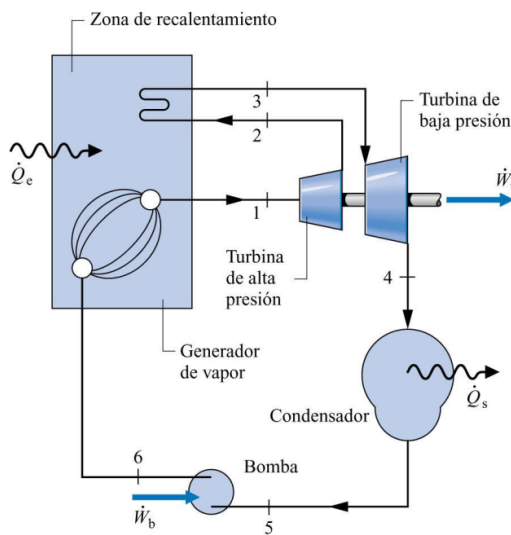
- Campo solar: recibe la energía solar directa y la concentra en el colector para calentar el fluido calorportador.
- Sistema de almacenamiento: su función es la de guardar el calor generado en el campo solar para su utilización en el futuro.
- Generador de vapor: se utiliza el calor recolectado en el campo solar para transformar el fluido de trabajo del ciclo Rankine de agua a vapor.
- Bloque de potencia: se transforma finalmente el calor recolectado en energía eléctrica, mediante la expansión del fluido de trabajo dentro de la turbina de vapor, además incorpora el condensador, los diversos regeneradores y las bombas que impulsan el fluido de trabajo.

2.6. Ciclo Rankine de potencia

Uno de los métodos más comunes de generación de energía eléctrica es mediante un ciclo de potencia con turbina de vapor, también conocido como ciclo Rankine, a partir del cual se transforma la energía aportada en forma de calor en energía eléctrica [23].

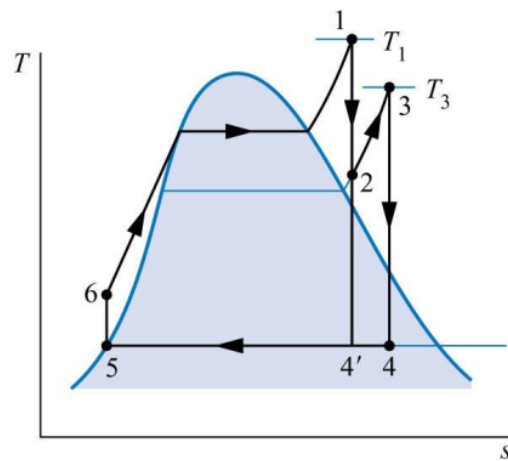
Este ciclo utiliza agua como fluido de trabajo y necesita como mínimo cuatro elementos esenciales:

- Bomba: se introduce energía al sistema para aumentar la presión del fluido y hacerlo circular a través del ciclo.
- Caldera: se aporta calor al fluido, vaporizándolo y aumentando su temperatura lo más posible.
- Turbina de vapor: se expande el vapor a través de la turbomáquina, extrayendo la energía del fluido y transformándola en energía mecánica de rotación de la turbina, que al acoplar un generador se convierte en energía eléctrica.
- Condensador: disminuye la temperatura del fluido tras dejar la turbina, condensándolo para poder impulsarlo de nuevo utilizando la bomba.



(a) Componentes de un ciclo Rankine.

Fuente: [23]



(b) Diagrama T-S de un ciclo Rankine.

Fuente: [23]

Fig. 2.20. Ciclo Rankine de potencia

2.7. Geometría solar

Para poder orientar adecuadamente los espejos reflectores es necesario conocer la dirección desde la cual proviene la radiación solar directa, esto se logra a partir de los ángulos solares y de la posición geográfica del receptor [6].

- Latitud (ϕ): ubicación angular con respecto al ecuador, considerando la orientación norte como positiva. Es constante para una ubicación geográfica definida.
- Declinación (δ): posición angular del sol al mediodía solar, con respecto al plano ecuatorial. Depende del día del año considerado. Considerando “ n ” como el día del año evaluado, se calcula:

$$\delta = 23,45 * \sin\left(360 * \frac{284 + n}{365}\right)$$

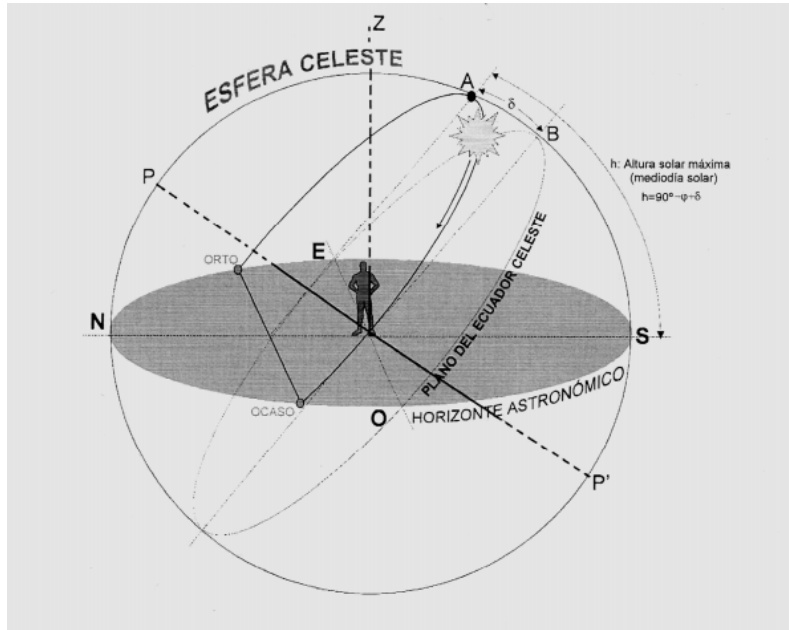


Fig. 2.21. Trayectoria aparente del sol. Fuente: [24]

- Ángulo horario (ω): desplazamiento del sol hacia el este o el oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su propio eje. Se considera el mediodía solar como 0° , variando 15° por hora, siendo en la mañana negativo y en la tarde positivo. Tomando “ TSV ” como la hora solar, se define ω como:

$$\omega = 15 * (TSV - 12)$$

- Ángulo cenital (θ_z): ángulo de incidencia de la radiación directa con respecto a la superficie horizontal, definido por la vertical y la línea que conecta el observador al sol. Es posible calcular su valor utilizando los ángulos solares definidos anteriormente:

$$\theta_z = \arccos((\cos(\delta) * \cos(\phi) * \cos(\omega)) + (\sin(\delta) * \sin(\phi)))$$

- Altitud solar (α_s): ángulo complementario al ángulo cenital.
- Ángulo azimutal (γ_s): desplazamiento angular desde la dirección sur de la proyección horizontal de la radiación directa, considerando hacia el este como negativo, y hacia el oeste como positivo. Se calcula:

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) * |\arccos(\frac{(\cos(\theta_z) * \sin(\phi)) - \sin(\delta)}{\sin(\theta_z) * \cos(\phi)})|$$

Donde “sign(ω)” tiene un valor igual a la unidad, con el signo correspondiente al ángulo horario evaluado, este es un signo negativo para las horas de la mañana, y positivo para las horas de la tarde.

- Inclinación (β): inclinación de espejo reflector con respecto a la superficie horizontal.
- Ángulo azimutal de la superficie (γ): desviación de la proyección horizontal de la normal de la superficie inclinada, con las mismas consideraciones que el ángulo azimutal.
- Ángulo de incidencia (θ): similar al ángulo cenital, pero comparando el ángulo de incidencia de la radiación directa, con la normal de la superficie inclinada. Con una distribución Norte-Sur del campo de heliostatos, el ángulo azimutal de la superficie tiene un valor de $\pm 90^\circ$, y el ángulo de incidencia que interesa es el que resulta de la proyección con el plano Este-Oeste, denominado ángulo transversal (θ_{trans}) y calculado de la siguiente manera [25]:

$$\theta_{trans} = \arctg(\frac{\sin(\gamma_s)}{\text{tg}(\alpha_s)})$$

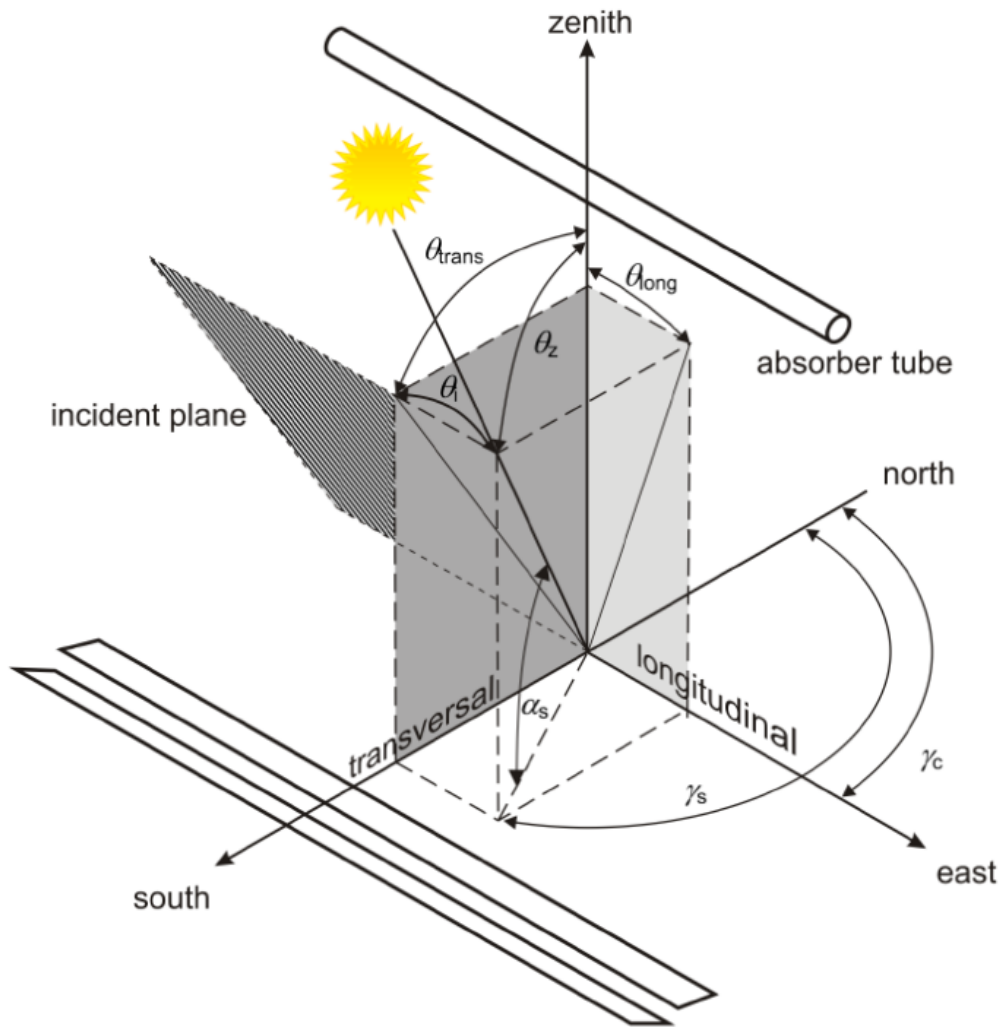


Fig. 2.22. Ángulos solares. Fuente: [25]

En la figura 2.22 el campo solar presentado tiene orientación Este-Oeste, pero resulta de gran utilidad para observar los ángulos solares de interés. El ángulo transversal es perpendicular a la longitud del colector, y con esta orientación su definición sería diferente a la presentada anteriormente. Por otro lado el ángulo que se observa en la figura como ángulo azimutal, sería el suplementario al definido mediante la ecuación utilizada para definirlo en este proyecto, pero a efectos prácticos la relación geométrica sigue siendo la misma, lo que cambia es el punto de referencia.

2.8. Rendimiento óptico del campo solar

El rendimiento de un campo de concentración solar Fresnel, se define en función de las pérdidas ópticas, que relacionan la radiación incidente en el colector y la radiación incidente en el campo solar. A partir del rendimiento óptico final de cada espejo, el DNI y los anchos del colector y los espejos, es posible determinar el flujo de calor que incide finalmente en el colector solar [26].

$$\dot{Q}_i = \frac{DNI * \eta_i * \omega_{esp}}{\omega_{col}}$$

El rendimiento óptico para una fila de espejos depende de los diversos factores de pérdidas:

- Pérdida del coseno ($\cos\alpha$): reducción del área de colección solar en una fila de espejos debido al ángulo de incidencia entre la normal del espejo y la dirección de la radiación directa. Este tipo de pérdida solo afecta a los espejos primarios, por lo que en el reflector secundario no hay pérdidas de este estilo, ya que no hay reducción de la superficie de colección.

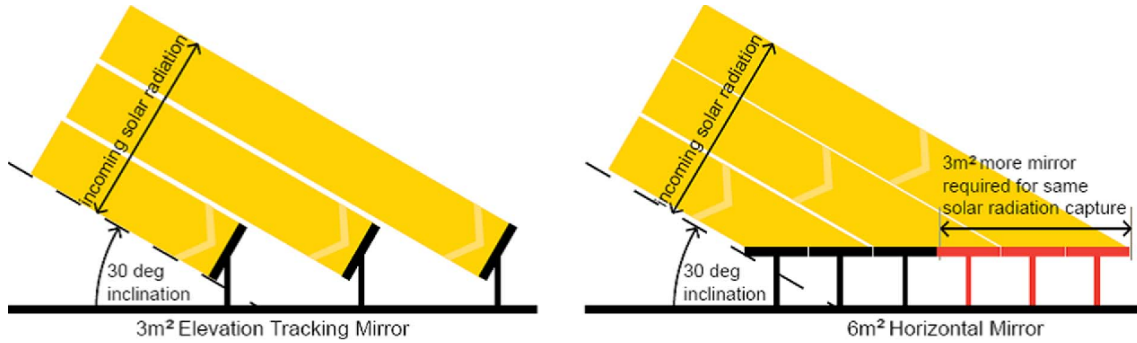


Fig. 2.23. Pérdida del coseno. Fuente: [27]

- Reflectividad (ρ): proporción de la radiación directa que es realmente reflejada por los espejos, debe considerarse tanto la reflexión de los espejos primarios, como del reflector secundario. Se considera que todos los espejos tienen una reflectividad de $\rho=0.96$.
- Sombras y bloqueos (ζ_{syb}): toma en cuenta toda la proporción de la radiación que consigue llegar al colector solar. Debe considerarse primero la sombra generada sobre los espejos, que evita que reciban la radiación proveniente del sol, y luego el bloqueo ocasionado por los espejos adyacentes, que impiden que la radiación reflejada consiga alcanzar el colector.

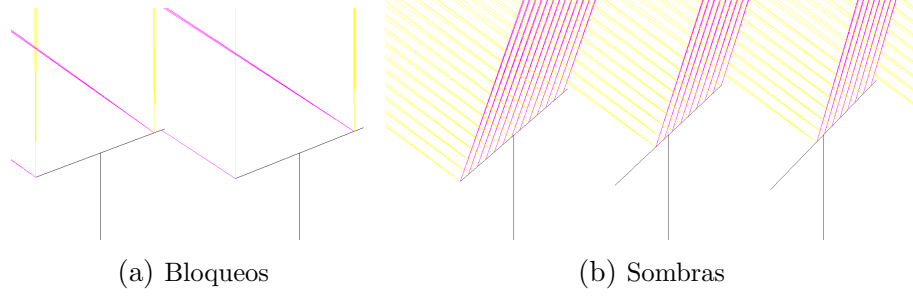


Fig. 2.24. Sombras y bloqueos. Fuente: Propia

- Factor de fin (ζ_{fin}): refleja la proporción de radiación perdida al final del colector debido a la altitud solar.
- Factor de desborde (ζ_{desb}): representa la proporción de radiación que es reflejada por el reflector secundario, y la que realmente alcanza el colector. Se puede definir en función de la apertura máxima de los rayos reflejados y la apertura del colector.

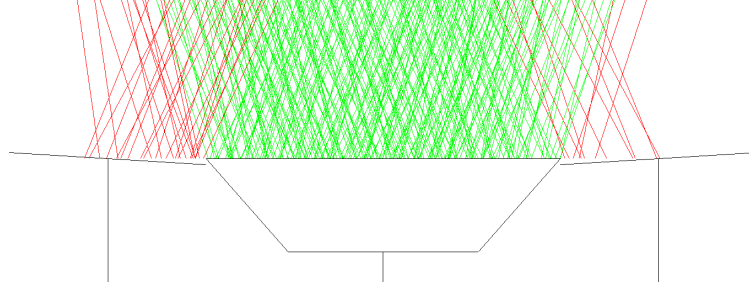


Fig. 2.25. Factor de desborde. Fuente: Propia

Finalmente se obtiene el rendimiento óptico de una fila de espejos como:

$$\eta_{esp} = \cos(\alpha_{esp}) * \rho_{esp} * \rho_{hyp} * \zeta_{syb} * \zeta_{fin} * \zeta_{desb}$$

2.9. FRESDEMO

Para desarrollar el estudio se utilizará el campo solar de FRESDEMO como modelo. Este LFC está ubicado en Puerto Errado II, Murcia, a una latitud de 38 grados, 16 minutos y 42 segundos. Cuenta con 25 espejos con un ancho de 60 cm cada uno, separados 85 cm y apuntando a un colector ubicado 8 m por encima del espejo central, con orientación Norte-Sur [28]. Se puede observar la distribución y las dimensiones del campo solar en la figura siguiente:



Fig. 2.26. Central LFC FRESDEMO. Fuente: [28, p64]

3. TECNOLOGÍA A DESARROLLAR

Los distintos sistemas de generación de energía mediante concentración de la radiación solar utilizan diferentes fluidos calorportadores: los sistemas PTC utilizan aceite térmico, los discos Stirling aire, los LFC agua y las centrales de torre utilizan sales fundidas, que entre todos los fluidos es el que permite obtener las mayores temperaturas además de permitir el almacenamiento de calor. Sin embargo estas sales presentan el inconveniente de que al superar una temperatura de $565\text{ }^{\circ}\text{C}$ sufren problemas de corrosión, suponiendo un límite para la generación de potencia. Es por esto que se busca remplazar el fluido calorportador por partículas, que permiten superar los $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que resulta de gran interés estudiar la posibilidad de acoplar un receptor de partículas en lecho fluidizado a una planta de concentración solar LFC. Movilizar estas partículas es un proceso complejo y costoso, por lo que se proponen una serie de modificaciones en el campo de concentración para facilitar su manipulación.

Lo primero es ubicar el colector al mismo nivel de los espejos, de este modo no hay que elevar las partículas hasta la altura original del colector. Para ubicar el colector a este nivel se debe suprimir la fila central de espejos y colocar un reflector secundario a una altura similar a la que se encontraría el colector. Este reflector debe ser hiperbólico, y los focos de esta hipérbola deben estar ubicados, uno a la altura original del colector, y otro a la altura del nuevo colector, esto se debe a que por las propiedades de la hipérbola cualquier rayo solar apuntado hacia un foco, será reflejado hacia el otro [29].

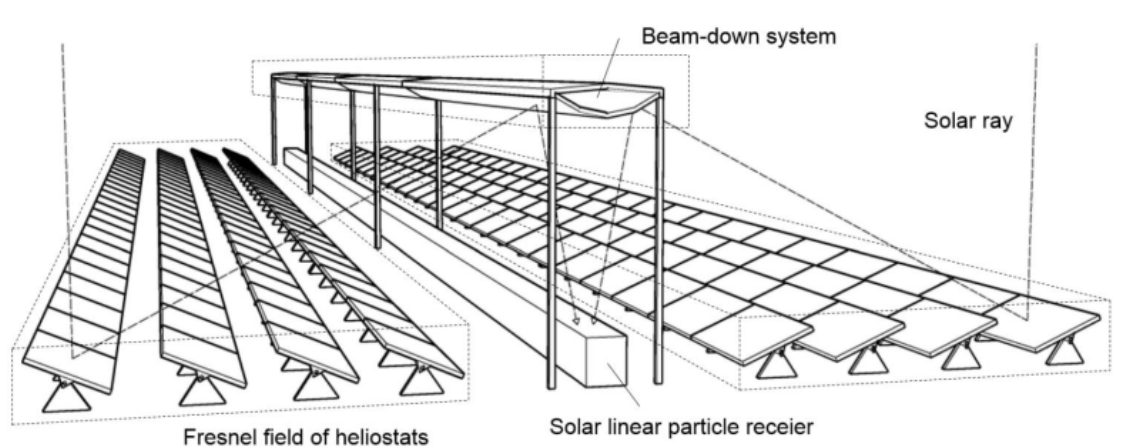


Fig. 3.1. LFC con sistema beam-down. Fuente: [29, p2]

3.1. Hipérbola

La hipérbola es una curva abierta de la familia de las cónicas, que se caracteriza porque cualquiera de sus puntos se encuentra en una posición tal que el valor absoluto de la diferencia de sus distancias a dos puntos fijos, denominados focos, es igual a la distancia entre los vértices [30]. Esta relación se define como:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1$$

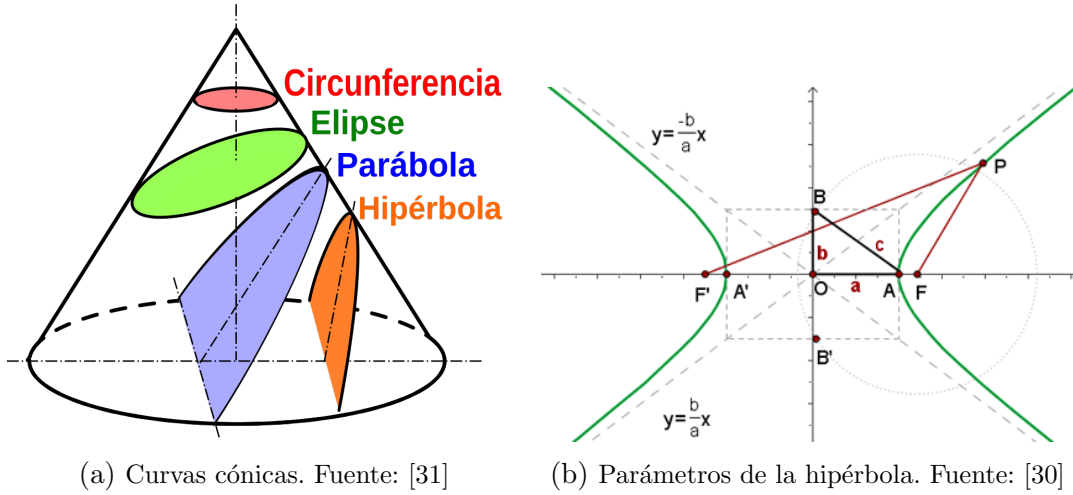


Fig. 3.2. Definición hipérbola

Otro parámetro que define la hipérbola es su excentricidad, que mide el grado de apertura de la misma. Tomando $e = 0,5 + \frac{a}{2c}$ esta queda acotada entre 0.5 y 1.

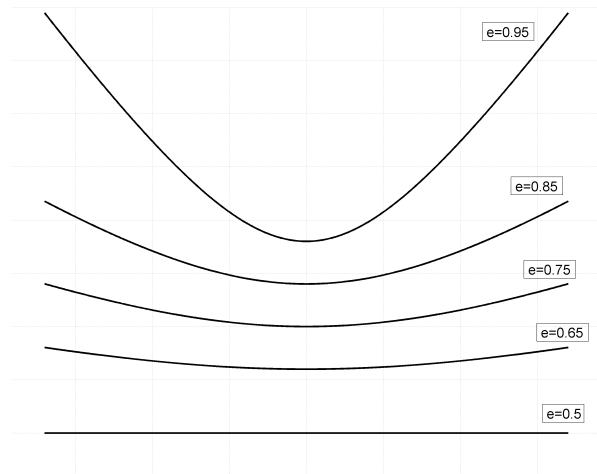


Fig. 3.3. Variación de la curva con la excentricidad. Fuente: Propia

El propósito de este trabajo consiste en el análisis de la efectividad de una hipérbola discretizada como reflector secundario, evaluando cuántos espejos planos se necesitan para obtener un rendimiento similar al de una hipérbola ideal. Para ello se toman diversos puntos de la curva, separados una distancia horizontal fija, que son unidos mediante espejos planos para construir la hipérbola discretizada. Posteriormente la semejanza con la curva ideal es evaluada utilizando el factor R cuadrado.

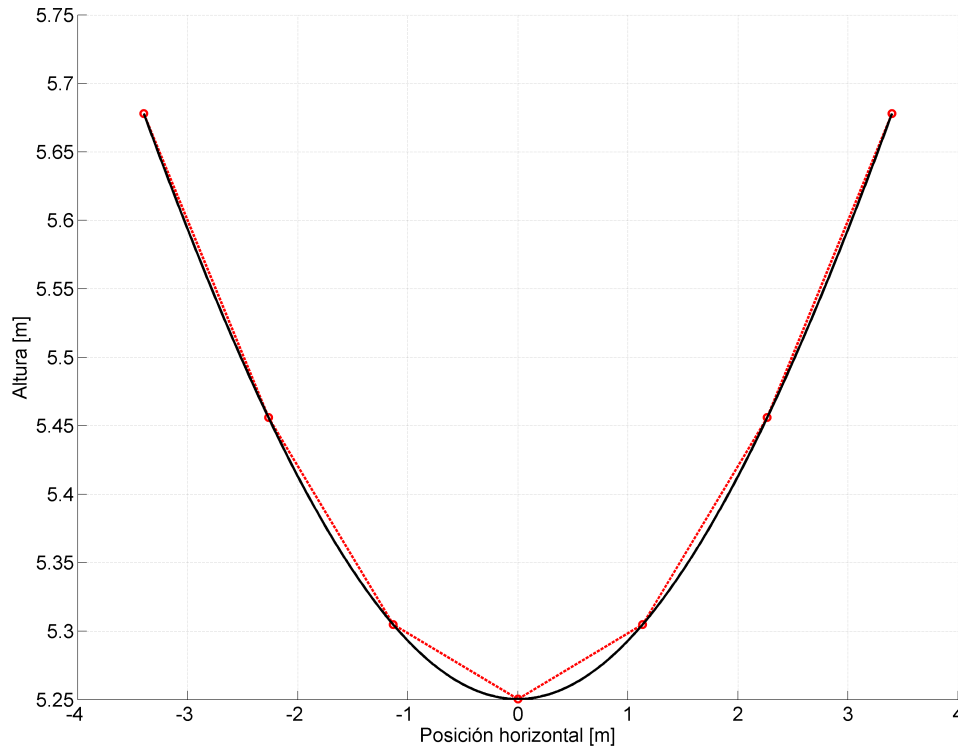


Fig. 3.4. Hipérbola ideal e hipérbola discretizada. Fuente: Propia

3.2. Factor R cuadrado (R^2)

El factor R cuadrado es un método estadístico que permite determinar qué tan cerca está cierta data con respecto a una curva definida, este factor varía entre cero y uno, y mientras más cerca se encuentre de la unidad mayor será la semejanza entre la data y la curva comparada. En el caso que compete se utiliza para determinar el grado de semejanza entre la hipérbola ideal y su versión discretizada [32]. Para hallar este valor se utiliza el código de MATLAB desarrollado por el profesor Jered Wells de la Universidad de Duke [33].

3.3. Modelo final

La distribución final utilizada para el modelo tiene un total de 24 espejos primarios planos de 60 cm, separados 84 cm entre sí, y ubicados a 2 m del suelo; un receptor de 108 cm de ancho a la misma altura de los espejos primarios y una hipérbola de 680 cm de ancho con una excentricidad de 0.6563, cuyos focos están, uno a la misma altura de los espejos primarios, y el otro 8 metros por encima del primero. Todos estos parámetros se mantienen fijos para el estudio del rendimiento del campo solar, el único que se procede a variar es la excentricidad para hallar el valor de máximo rendimiento para la disposición de campo solar.

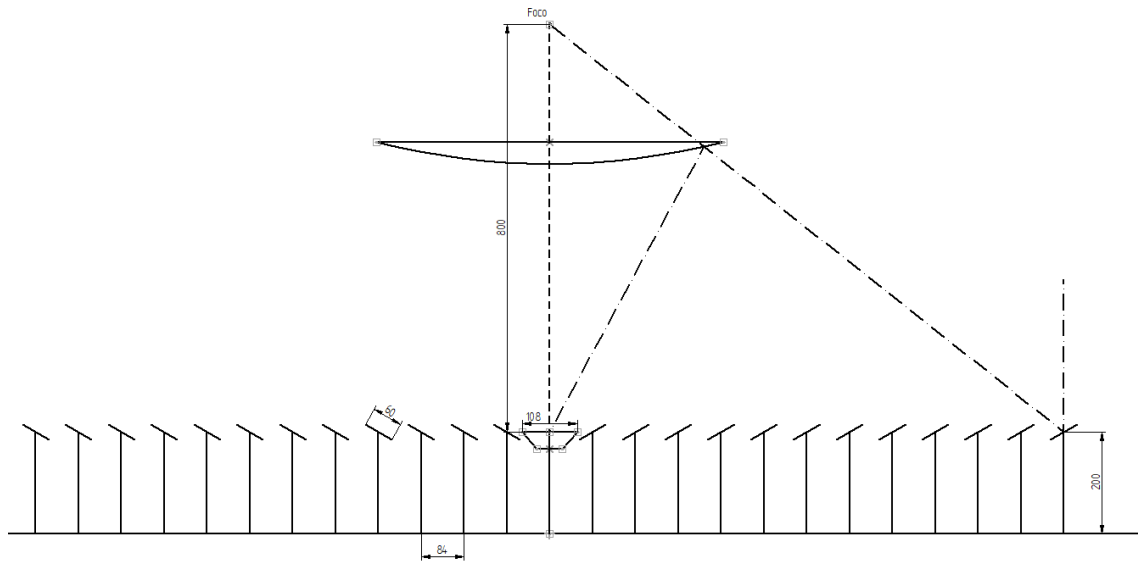


Fig. 3.5. Campo LFC con beam-down estudiado. Fuente: Propia

4. METODOLOGÍA

Se desea obtener el flujo de calor que alcanza al colector final de la instalación LFC con un reflector secundario beam-down acoplado, para alcanzar dicho objetivo se siguen los siguientes pasos:

- Se desarrolla un código en MATLAB que permite simular el funcionamiento de la planta de concentración solar deseada.
- Con el modelo desarrollado se obtienen los resultados para todas las configuraciones que serán analizadas, variando el número de espejos que conforman el reflector secundario o la excentricidad de la hipérbola.
- Se desarrolla un segundo código en MATLAB que permite obtener los parámetros geométricos necesarios para definir el campo solar en SolTrace.
- Se procede a validar los resultados utilizando SolTrace, para las mismas configuraciones evaluadas en MATLAB.
- Finalmente se comparan los resultados obtenidos utilizando ambos métodos.

4.1. Modelo de MATLAB

MATLAB es un software de cómputo numérico que permite manipular matrices, implementar funciones, algoritmos y representar datos y funciones, además cuenta con un lenguaje de programación propio que permite desarrollar modelos y simulaciones [34].

Se desarrolla un modelo en MATLAB que simula todas las reflexiones de los rayos solares incidentes en los diversos espejos hasta alcanzar, o no, el colector. Además se tiene en cuenta el ángulo de apertura solar que se aprecia en la figura 2.1.

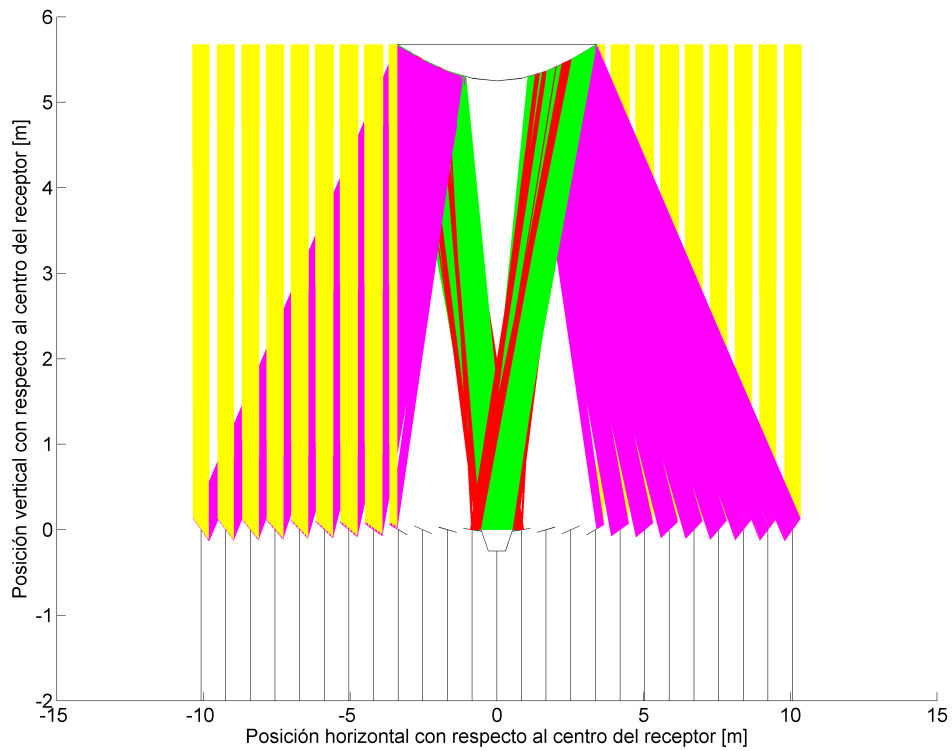
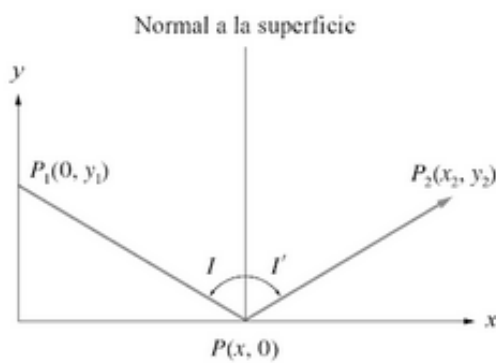
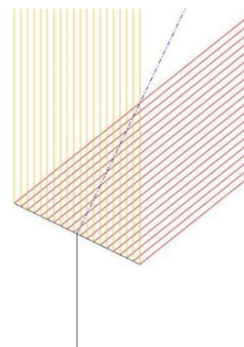


Fig. 4.1. Representación del problema en MATLAB. Fuente: Propia

El código está basado en el principio de reflexión óptica, el cual establece que el ángulo de incidencia de un rayo, con respecto a la normal de la superficie, es igual al ángulo de salida de la reflexión con respecto a dicha normal.



(a) Principio de reflexión. Fuente: [35]



(b) Reflexión en un espejo primario. Fuente: [36]

Fig. 4.2. Reflexión de rayos solares

El modelo desarrollado determina en función de la posición geográfica, el día del año y la hora solar, el ángulo transversal de incidencia de la radiación directa. Una vez conocido este ángulo calcula la inclinación que debe presentar cada espejo para que el rayo solar que alcanza el punto central de dicho espejo sea reflejado hacia el foco superior de la hipérbola. Cuando ya se conoce la inclinación de todos los espejos del campo solar se procede a evaluar todos los rayos que inciden en cada uno de los espejos primarios, uno por uno. El número total de rayos por espejo es definido según la precisión requerida en los resultados. De este modo se determina si el rayo solar estudiado se ve bloqueado por el reflector hiperbólico secundario o por otro espejo adyacente, y si finalmente alcanza el colector solar. Este procedimiento se repite dos veces más por rayo, tomando en cuenta el factor de la apertura solar.

Se determina el rendimiento óptico para cada espejo del sistema. El índice de reflexión es constante y se toma un valor de 0.96 para cada espejo. La pérdida del coseno se calcula para cada espejo primario con las relaciones geométricas ya conocidas. Las sombras y bloqueos se determinan en función de los rayos solares que superan toda la instalación y llegan a la zona final después de las dos reflexiones, sin importar si alcanzan o no el colector, en relación con los rayos que emergen de cada espejo primario. El factor de desborde se establece en relación de la proporción de rayos que alcanzan el colector con respecto a los rayos que alcanzan la zona final del sistema. Finalmente el factor de fin es despreciado al considerar que el campo solar tiene la extensión suficiente para que el flujo de calor sea estable a lo largo del mismo.

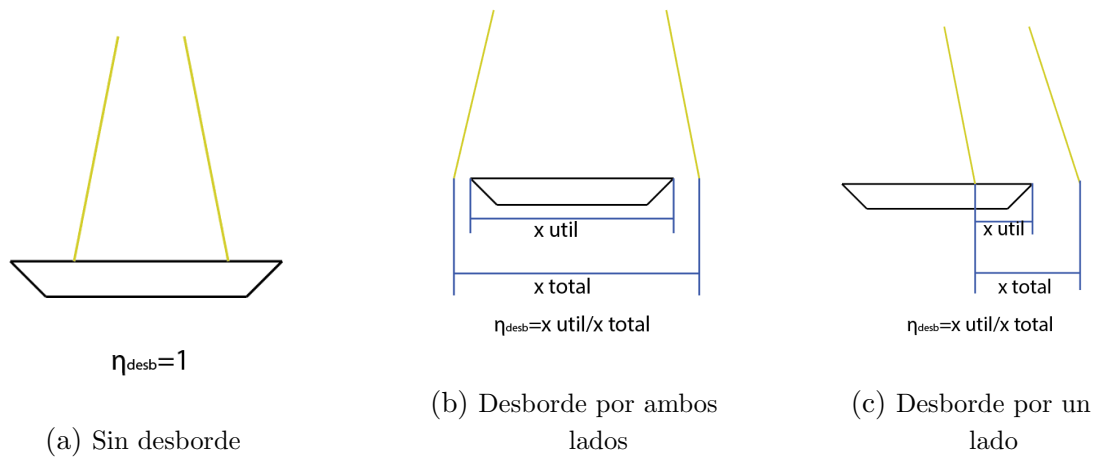


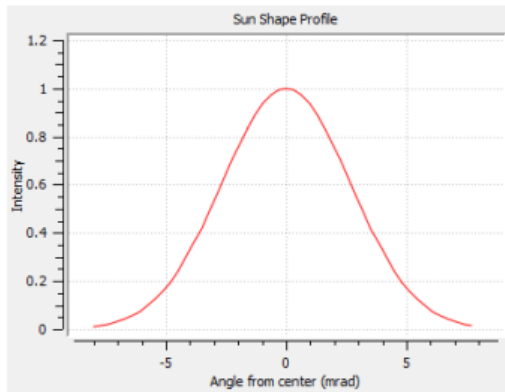
Fig. 4.3. Definición de factor de desborde. Fuente: Propia

Una vez obtenido el rendimiento de cada espejo, se calcula el flujo de calor generado por cada uno de ellos y se suman para obtener el flujo de calor total del campo solar.

4.2. Validación en SolTrace

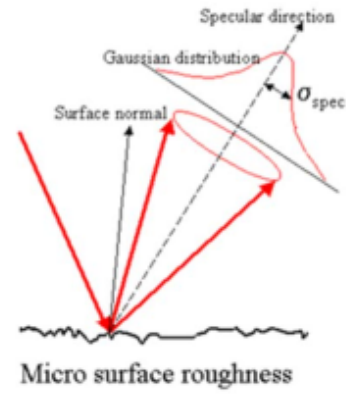
El segundo método consiste en utilizar el software desarrollado por el Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) de Estados Unidos, conocido como SolTrace, que utiliza una tecnología de trazado de rayos, comenzando en la posición que ocuparía el sol, y recorriendo todo el sistema [37].

Este programa informático permite definir la distribución de la intensidad en el disco solar, las propiedades ópticas de los diversos elementos del sistema y las irregularidades de los mismos, además de poder visualizar los flujos de calor resultantes en cada elemento.



(a) Distribución de la intensidad solar.

Fuente: [37, p5]



(b) Error superficial.

Fuente: [37, p8]

Fig. 4.4. Propiedades definidas en SolTrace

SolTrace utiliza el método de Montecarlo para simular el trazado de rayos. Este método se basa en la construcción de diversos modelos de resultados posibles sustituyendo un rango de valores por factores con incertidumbre y calculando sucesivamente utilizando diversos valores aleatorios obtenidos de una función de probabilidad [38].

Para poder definir el reflector hiperbólico secundario en SolTrace es necesario utilizar los polinomios de Zernike, que son una serie de polinomios definidos en un rango determinado y que siguen una relación de ortogonalidad. Estos polinomios son la única manera de generar una curva con los parámetros deseados dentro del programa utilizado [39].

Para hallar el polinomio de Zernike que define la hipérbola se utiliza la expresión simplificada:

$$z(x, y) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^i B_{i,j} * x^j * y^{i-j}$$

Tomando un grado igual a 4, y todos los valores de “ y ” nulos, se obtiene el polinomio que representa la hipérbola:

$$z(x) = 5,251 + 0,04205x^2 - 0,0004421x^4$$

Para poder utilizar SolTrace se define primero la forma solar considerada como una función gaussiana con una desviación $\sigma=2.73$, luego se determinan las propiedades ópticas de espejos y receptores, tomando la reflectividad con un valor de 0.96, la transmisividad con un valor igual a la unidad. El error de inclinación se toma como 0.95 mrad y el error de especularidad como 0.2 mrad para los espejos, valores predeterminados en el software utilizado. Finalmente para el receptor todos los parámetros se toman nulos, salvo la transmisividad que se mantiene igual a la unidad.

Lo siguiente es definir la geometría del sistema. La primera parte está formada por los espejos primarios que reflejan la radiación solar que incide directamente sobre ellos hacia el foco superior de la hipérbola. Esta primera etapa es fácil de definir ya que está compuesta por espejos planos, todos al mismo nivel y del mismo ancho, por lo que solo es necesario conocer la separación que debe haber entre ellos para poder definir su posición horizontal, y la inclinación que debe tener cada espejo en función de la hora del día para obtener la reflexión deseada.

La segunda parte del sistema es la más compleja de definir y debe realizarse de dos maneras diferentes, una para el modelo con un espejo hiperbólico y otra para el modelo de hipérbola compuesta por espejos planos. En el primer caso se utiliza la función de `sfit` de MATLAB para obtener el polinomio de Zernike del grado deseado que genere la curva que se asemeje a la hipérbola con los valores definidos anteriormente. En el segundo caso se desarrolla un código en MATLAB que permite discretizar la hipérbola y obtener los datos necesarios para definir cada uno de los espejos planos que la componen, obteniendo así la ubicación de los centros geométricos, la inclinación y el ancho de cada espejo. Finalmente se definen las características geométricas del receptor, en particular su ancho y su posición.

| cx | cy | x_aim | y_aim | w |
|-----------|-----------|--------------|--------------|----------|
| -2.975 | 5.5919 | -3.1774 | 4.5919 | 0.86724 |
| -2.125 | 5.4379 | -2.2851 | 4.4379 | 0.86082 |
| -1.275 | 5.3256 | -1.3792 | 4.3256 | 0.8546 |
| -0.425 | 5.2659 | -0.46136 | 4.2659 | 0.85056 |
| 0.425 | 5.2659 | 0.46136 | 4.2659 | 0.85056 |
| 1.275 | 5.3256 | 1.3792 | 4.3256 | 0.8546 |
| 2.125 | 5.4379 | 2.2851 | 4.4379 | 0.86082 |
| 2.975 | 5.5919 | 3.1774 | 4.5919 | 0.86724 |

Fig. 4.5. Geometría de cada espejo obtenida en MATLAB. Fuente: Propia

| X-Coord. | Y-Coord. | Z-Coord. | X-AimPt. | Y-AimPt. | Z-AimPt. | Z-Rot. | Aperture |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------|------------------------|
| -2.975 | 5.5919 | 0 | -3.1774 | 4.5919 | 0 | 0 | r-50,0.86724,0,0,0,0,0 |
| -2.125 | 5.4379 | 0 | -2.2851 | 4.4379 | 0 | 0 | r-50,0.86082,0,0,0,0,0 |
| -1.275 | 5.3256 | 0 | -1.3792 | 4.3256 | 0 | 0 | r-50,0.8546,0,0,0,0,0 |
| -0.425 | 5.2659 | 0 | -0.46136 | 4.2659 | 0 | 0 | r-50,0.85056,0,0,0,0,0 |
| 0.425 | 5.2659 | 0 | 0.46136 | 4.2659 | 0 | 0 | r-50,0.85056,0,0,0,0,0 |
| 1.275 | 5.3256 | 0 | 1.3792 | 4.3256 | 0 | 0 | r-50,0.8546,0,0,0,0,0 |
| 2.125 | 5.4379 | 0 | 2.2851 | 4.4379 | 0 | 0 | r-50,0.86082,0,0,0,0,0 |
| 2.975 | 5.5919 | 0 | 3.1774 | 4.5919 | 0 | 0 | r-50,0.86724,0,0,0,0,0 |

Fig. 4.6. Introducción de geometría en SolTrace. Fuente: Propia

Una vez definido completamente el campo solar se determina el número de rayos que se utilizan para la simulación. Este valor es proporcional al tiempo de cálculo que se necesita para simular el funcionamiento del sistema, por lo que debe de ser lo suficientemente alto para obtener un resultado representativo de la realidad y lo suficientemente bajo como para que los tiempos de cálculo no sean excesivamente largos. También se establece dentro del programa que se debe tener en cuenta la forma solar definida anteriormente y los errores de los espejos.

Tras realizar la simulación del sistema se obtienen los resultados. Se puede analizar el flujo de calor que recibe cada uno de los componentes del sistema, pero el que resulta de interés es el flujo de calor que alcanza al colector.

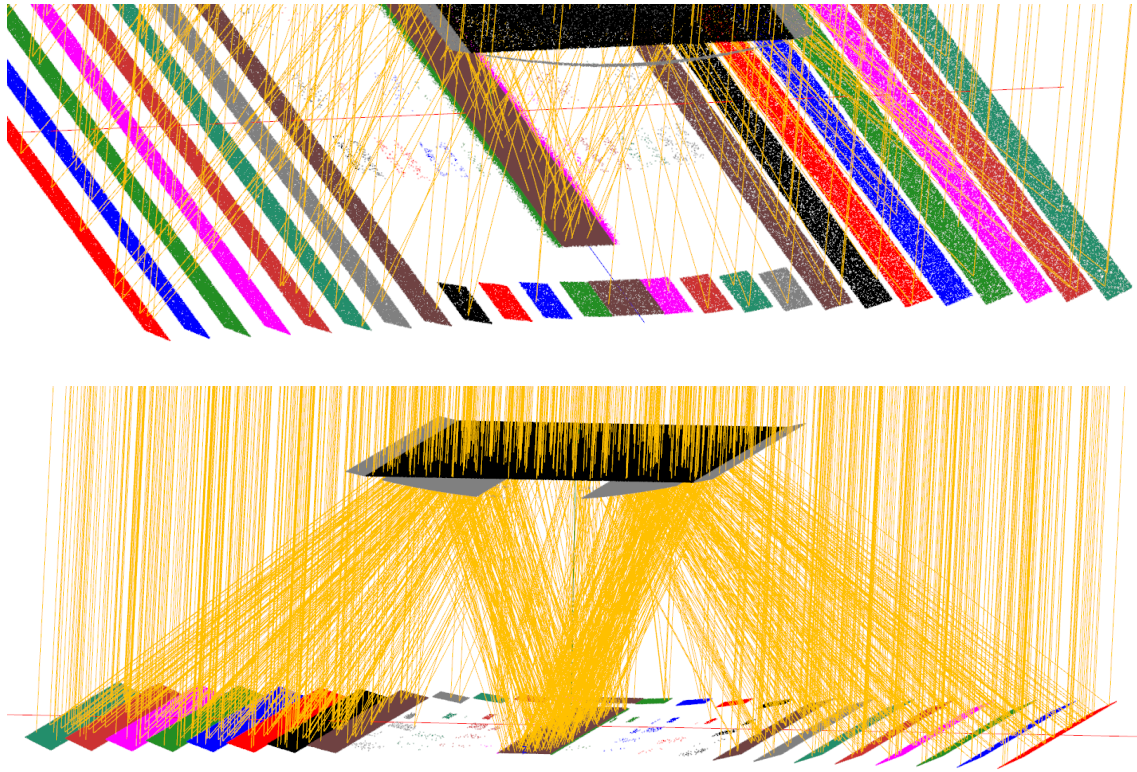
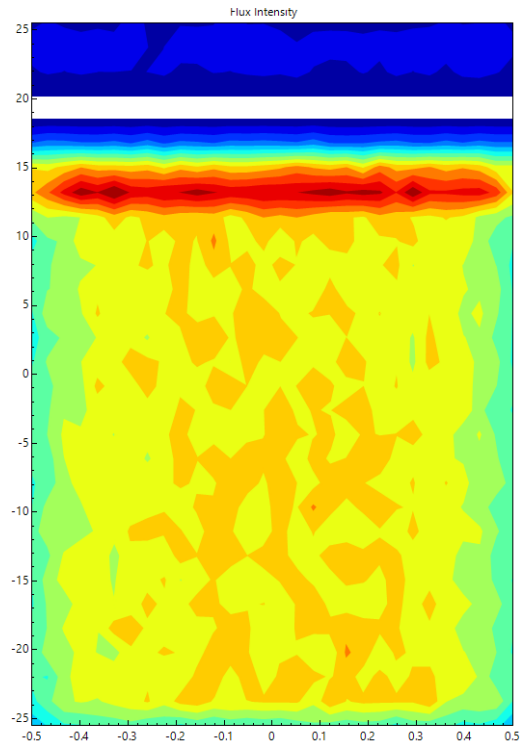
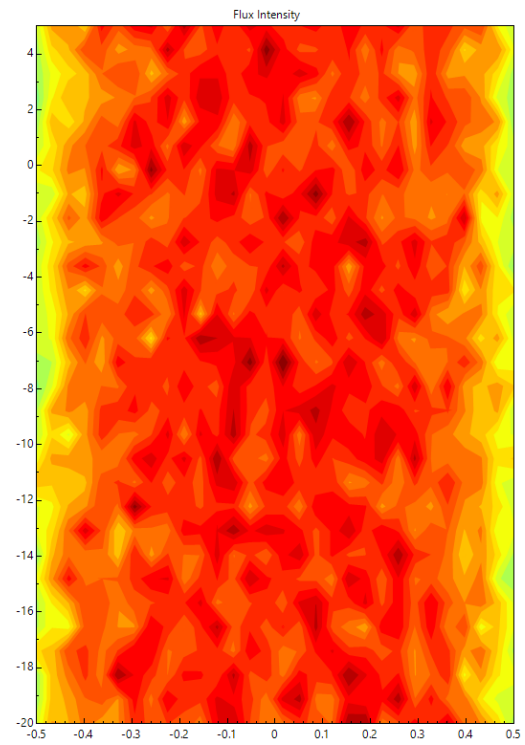


Fig. 4.7. Diagrama de la instalación en SolTrace. Fuente: Propia

En la figura 4.8(a) se observan 4 zonas claramente definidas. Analizando de arriba hacia abajo, la primera zona presenta un color azul oscuro y es la región del colector donde solo inciden los rayos que llegan del sol directamente. La segunda zona presenta un color blanco y es la porción del colector que no recibe rayos del sol de manera directa, y donde los rayos reflejados por los espejos aun no alcanzan el colector debido a la elevación solar existente, es decir, en esta zona no hay flujo de calor incidente. La tercera zona comienza con un color azul oscuro y termina con un color rojo, es la porción del colector donde todos los espejos primarios reflejan los rayos solares que finalmente alcanzan el colector, esta región termina cuando el reflector hiperbólico secundario bloquea varios de los espejos primarios. Finalmente la última zona, que presenta un color amarillo con ligeros tonos naranja, es la que realmente representa el flujo de calor que resulta útil para la instalación, ya que las primeras tres zonas se considera que tienen muy poca influencia debido a que la superficie en la que ocurren resulta despreciable frente a la superficie total del colector. En la figura 4.8(b) se observa el flujo de calor para el sistema ya estabilizado, sin tener en cuenta las primeras tres zonas, mientras que en la figura 4.7 se aprecia el origen de las cuatro zonas diferentes.



(a) Flujo de calor total



(b) Flujo de calor estable

Fig. 4.8. Flujo de calor en el colector. Fuente: Propia

5. RESULTADOS

Tras haber desarrollado el modelo de MATLAB y haber generado el sistema deseado en SolTrace se procede a obtener los resultados, variando los parámetros de la hipérbola para poder encontrar la configuración que genere un mayor flujo de calor para la ubicación geográfica estudiada, un número de espejos primarios determinado y una distancia entre focos de la hipérbola fija.

5.1. Influencia del número de rayos

Lo primero que se debe estudiar es el número de rayos a simular, necesarios para considerar que el resultado generado por el modelo de MATLAB converge. También se realiza un análisis similar con las intersecciones para la validación en SolTrace.

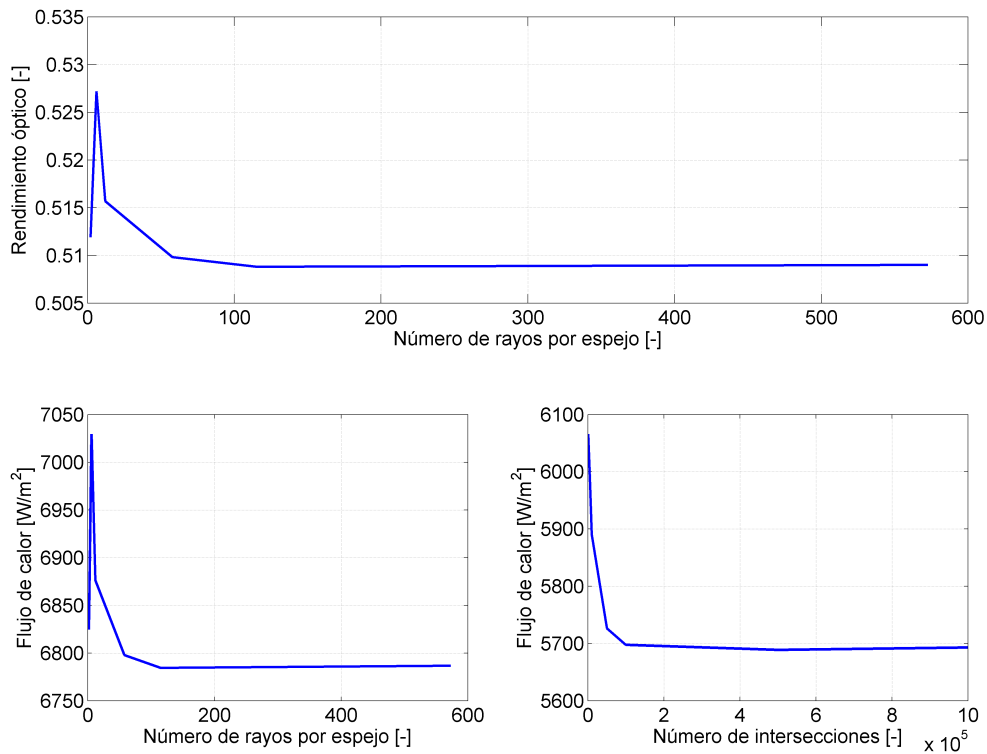


Fig. 5.1. Influencia del número de rayos utilizado en los resultados. Fuente: Propia

Se obtiene que para el modelo de MATLAB con tener en cuenta más de 50 rayos por espejo se puede considerar que el resultado obtenido es correcto, manteniendo a la vez al mínimo las exigencias computacionales para obtener dicho resultado.

En el análisis de SolTrace se observa que al superar las 10^5 intersecciones los resultados convergen, y cualquier número de intersecciones evaluadas por encima de este valor generan resultados correctos.

5.2. Influencia del número de espejos

Manteniendo el parámetro de excentricidad fijo con un valor de $e=0.6563$ y el resto de dimensiones con los valores definidos en la sección “Modelo Final” del capítulo “Tecnología a Desarrollar”, se calcula el flujo de calor que recibe el colector final variando el parámetro de la hora solar, para así obtener la variación del flujo a lo largo del día 21 de Marzo, representativo de todo el año. Este proceso se realiza con tres discretizaciones distintas, para una hipérbola de 4 espejos ($R^2=0.9809$), para otra de 8 espejos ($R^2=0.9988$) y para otra de 10 espejos ($R^2=0.9995$). En las tres representaciones se muestra también la evolución del flujo de calor utilizando una hipérbola ideal en SolTrace para poder comparar los tres gráficos de manera sencilla.

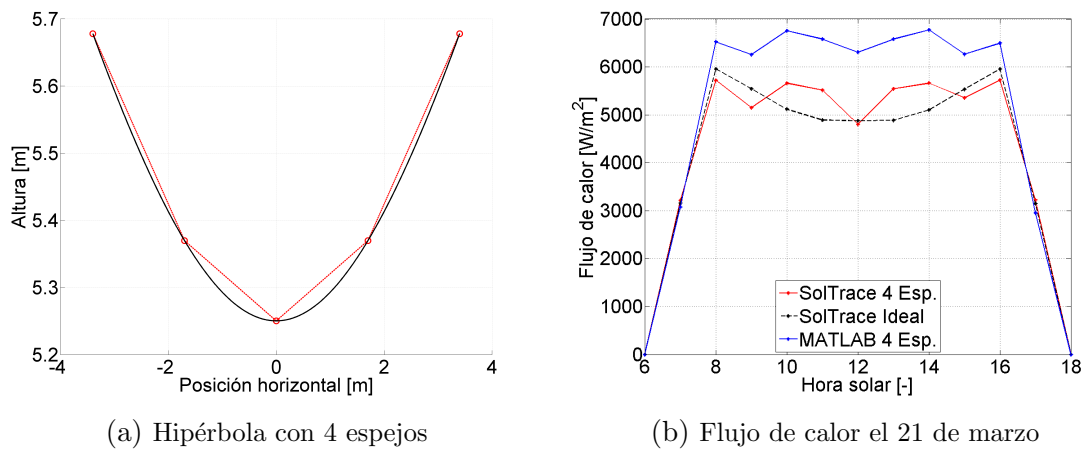


Fig. 5.2. Resultados con 4 espejos. Fuente: Propia

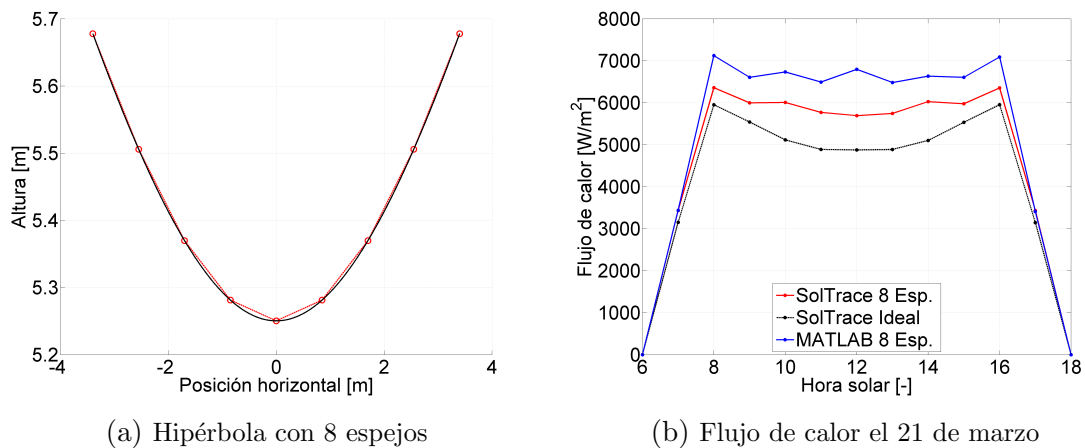


Fig. 5.3. Resultados con 8 espejos. Fuente: Propia

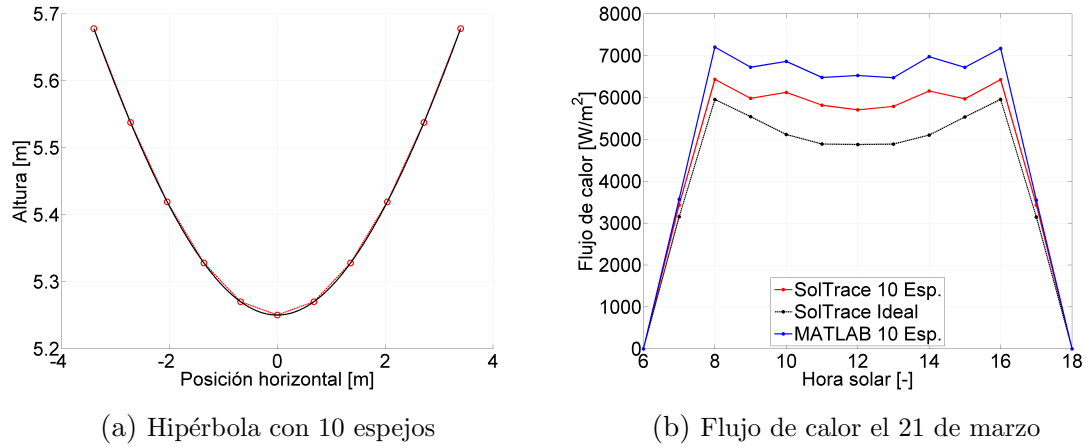


Fig. 5.4. Resultados con 10 espejos. Fuente: Propia

Lo primero que se observa es que el flujo de calor para la hipérbola discretizada obtenido utilizando el modelo de MATLAB es superior en los tres casos al flujo obtenido en SolTrace, ya que en el modelo no se toman en cuenta los errores de la superficie del espejo, se considera que estos son totalmente lisos y la reflexión es perfecta, mientras que SolTrace sí toma en consideración estos problemas causando una disminución del flujo de calor.

Por otro lado se aprecia que para los resultados obtenidos utilizando SolTrace, ya al utilizar una hipérbola compuesta por 4 espejos se obtiene un mayor flujo de calor que en la hipérbola ideal para algunas horas del día, y al incrementar a 8 espejos el flujo de calor obtenido utilizando espejos planos supera al de la hipérbola ideal a cualquier hora del día. Esto se debe a que al discretizar la hipérbola se reduce el desborde generado, que es uno de los principales inconvenientes de los reflectores secundarios hiperbólicos ya que disminuyen el rendimiento óptico del sistema de manera considerable [40].

Por otro lado, al comparar el flujo de calor en el mediodía solar, variando el número de espejos que componen la hipérbola discretizada se obtiene:

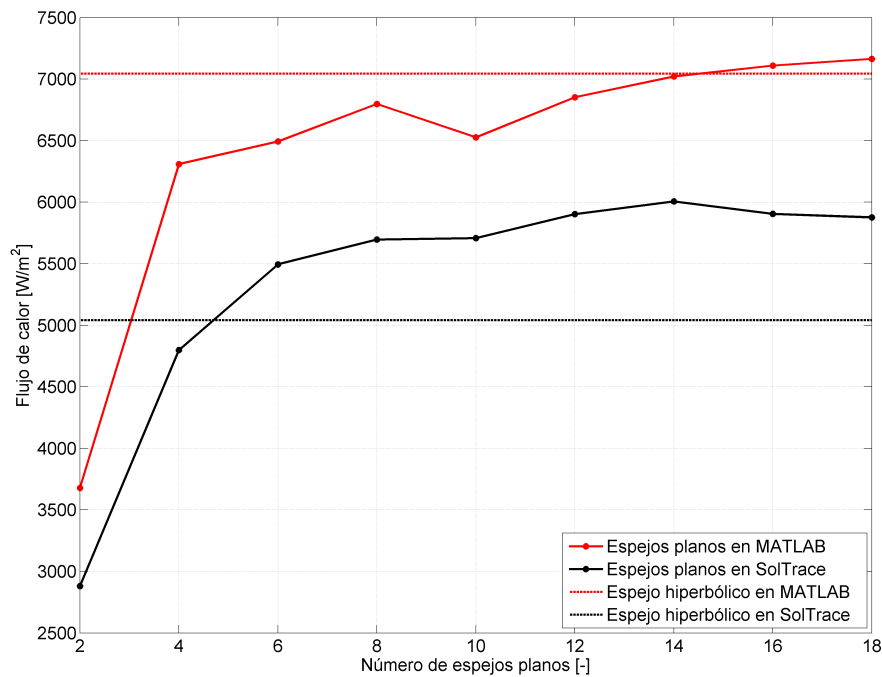


Fig. 5.5. Influencia del número de divisiones en la hipérbola. Fuente: Propia

En este gráfico las líneas discontinuas representan una hipérbola ideal tanto para el modelo de MATLAB como para la validación en SolTrace. Aquí se aprecia que en ambos casos el flujo de calor total es siempre superior en el modelo que en SolTrace por las razones explicadas previamente. También se observa que la evolución del flujo de calor en función del número de divisiones de la hipérbola sigue una forma similar en ambos casos.

En el análisis de SolTrace al llegar a la hipérbola compuesta por 6 espejos planos se sobrepasa el flujo de calor generado utilizando la hipérbola ideal, superándola casi en 500 W/m^2 , y al utilizar una hipérbola de 14 espejos se encuentra un máximo cercano a los 6000 W/m^2 , incrementando el flujo de calor casi un 20 % con respecto al caso de la hipérbola ideal. El flujo decrece a medida que se aumenta el número de espejos utilizados, ya que la discretización tiende a adquirir la forma de la hipérbola ideal al aumentar el número de espejos planos que la componen.

En el modelo de MATLAB la hipérbola ideal es definida con un número de espejos mucho mayor que los analizados al estudiar la discretización, de este modo se considera que para tomar la hipérbola como ideal se necesita un mínimo de 1000 espejos. Con estas consideraciones se obtiene el flujo de calor representado por la línea horizontal discontinua roja en la gráfica. En este caso se aprecia que el incremento del flujo de calor con el número de espejos es mucho más lento, llegando a superar el flujo generado por la hipérbola ideal al superar los 14 espejos para formar la hipérbola discretizada.

Esta variación se debe a que la imagen proyectada en el colector, que se relaciona directamente con el factor de desborde, depende de la reflexión de los rayos solares en el reflector secundario. De este modo, al variar el número de espejos que conforman la hipérbola, varía también el ángulo con el que los rayos incidentes sobre ella se ven reflejados. El sistema está diseñado para que el rayo central de los distintos espejos primarios, que está apuntando directamente al foco de la hipérbola, sea reflejado hacia el colector, presentando el resto de los rayos que salen del espejo primario una reflexión inadecuada para alcanzar el segundo foco de la hipérbola lo que genera una disminución del rendimiento óptico de la instalación al aumentar el desborde.

En la figura 5.6 se observa que el factor de desborde presenta unas variaciones significativas al variar el número de espejos que conforman el reflector hiperbólico secundario, en particular hasta 10 espejos. Sin embargo se aprecia que esta componente del rendimiento óptico estudiada tiene un carácter creciente luego de los 10 espejos, que luego debe decrecer hasta alcanzar el valor presentado por la hipérbola ideal, y que al utilizar más de 16 espejos se supera el rendimiento óptico de un espejo hiperbólico. Esto quiere decir que existe una hipérbola discretizada utilizando espejos planos que permite obtener una imagen proyectada en el colector mucho más adecuada que la proyectada por un espejo hiperbólico ideal, es decir, que los rayos reflejados en el reflector secundario son más exactos.

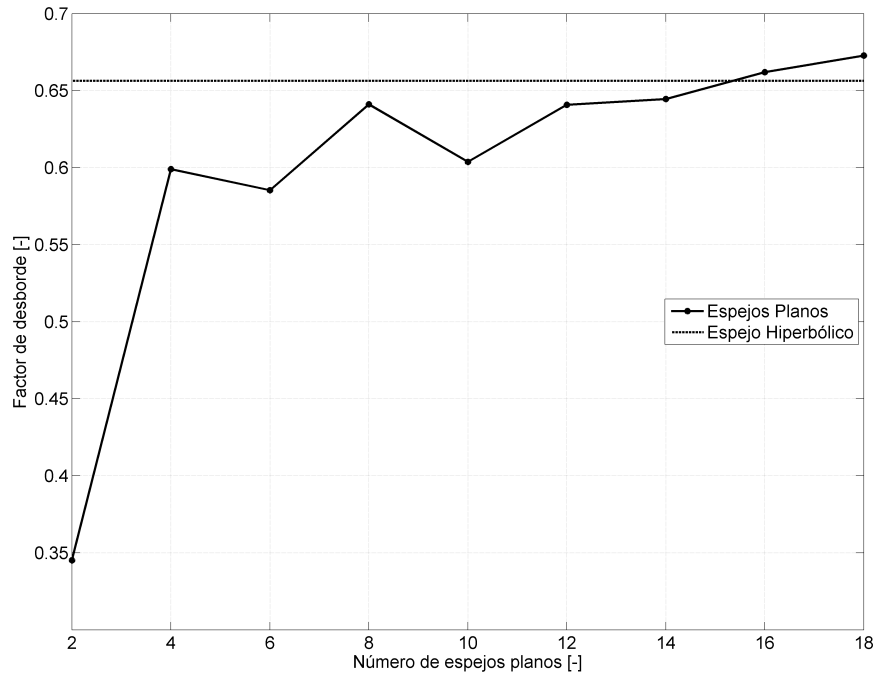


Fig. 5.6. Influencia del número de divisiones sobre el factor de desborde. Fuente: Propia

5.3. Influencia de la excentricidad

Posteriormente se realiza un estudio de la influencia de la excentricidad de la hipérbola sobre el flujo de calor que finalmente alcanza al colector, manteniendo el ancho total constante a 6.8 metros, la hipérbola discretizada con un total de 8 espejos planos y en el mediodía solar. Con estas consideraciones se obtiene:

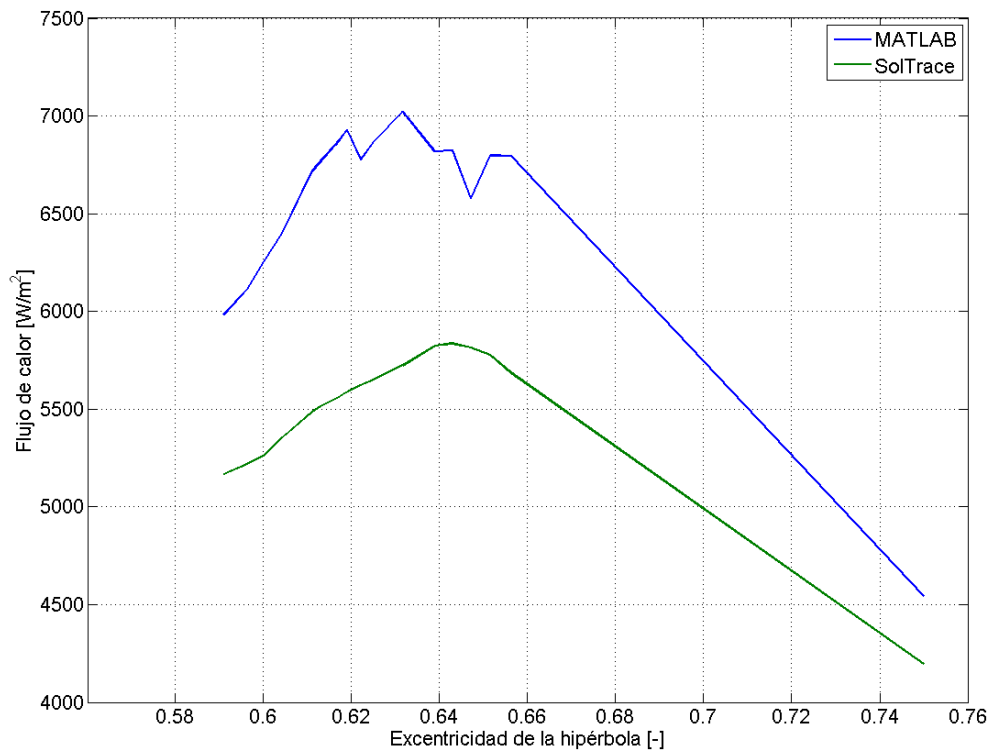


Fig. 5.7. Influencia de la excentricidad sobre los resultados. Fuente: Propia

Lo primero que se aprecia es que se mantiene la clara diferencia en el flujo de calor según el modelo de MATLAB y los resultados de SolTrace. Se observa que en ambos casos la forma general de la curva es bastante similar, sin embargo el perfil obtenido utilizando SolTrace es mucho más suave, sin presentar cambios bruscos al variar la excentricidad y alcanzando un valor de flujo de calor máximo en una excentricidad entre 0.64 y 0.65. Por otro lado la curva generada por el modelo de MATLAB presenta unas pendientes mucho más pronunciadas además de unas fluctuaciones violentas en la zona de máximo flujo de calor, obteniéndose el máximo local alrededor de una excentricidad de 0.63, valor lejano al obtenido en SolTrace.

Al analizar más detalladamente la razón de las grandes fluctuaciones obtenidas en el modelo de MATLAB, observando de manera más detallada la variación del flujo de calor para excentricidades entre 0.64 y 0.65 se descubre que ocurre un salto entre las excentricidades 0.643 y 0.645, y que este se debe a una disminución del rendimiento por el factor de desborde, además esta disminución se mantiene inclusive al aumentar el número de rayos por espejo, pero acotada entre excentricidades de 0.643 y 0.644.

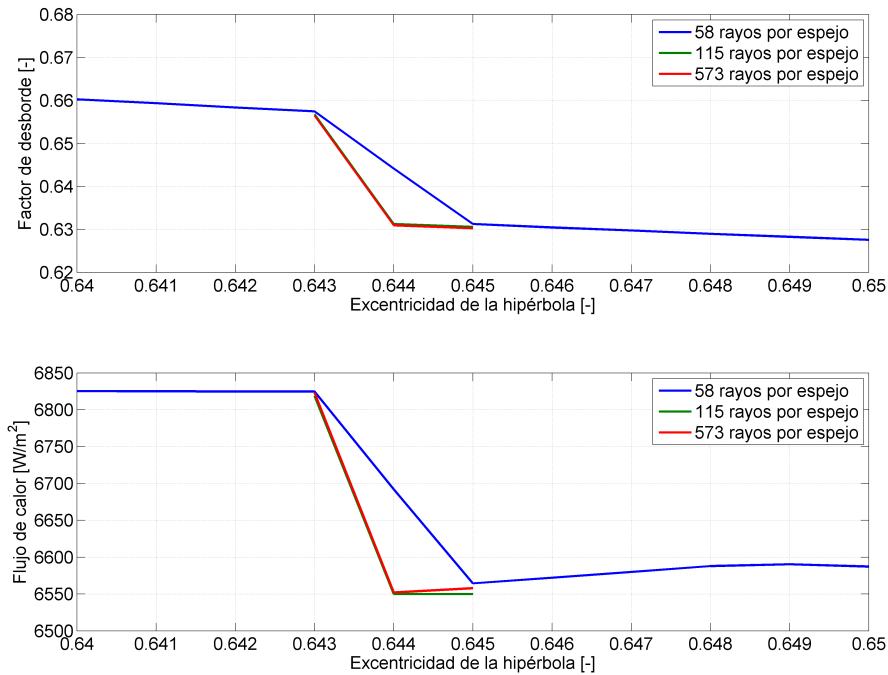


Fig. 5.8. Detalle de las variaciones con la excentricidad. Fuente: Propia

Este comportamiento se debe a que en este paso de la variación de la excentricidad la modificación generada en el reflector secundario repercute en un aumento significativo de la imagen proyectada en el colector, al reflejar un gran número de rayos con una inclinación que no es adecuada para alcanzar de manera satisfactoria el final del sistema.

El hecho de que estas fluctuaciones solo estén presentes en el modelo de MATLAB se debe a cómo se obtiene el flujo de calor que llega al colector final. Utilizando SolTrace simplemente se mide en la sección de resultados el flujo de calor en una superficie definida, mientras que en el modelo desarrollado en MATLAB se calcula el rendimiento óptico para cada espejo y en función de este rendimiento se obtiene el flujo de calor por espejo, que al sumarlos determinan el flujo de calor total de la instalación. Es por esto que aparecen las fluctuaciones, por la modificación drástica del rendimiento óptico.

5.4. Evolución del rendimiento óptico en el día

Un factor que interesa estudiar es la evolución de los distintos factores que afectan al rendimiento óptico a lo largo del día.

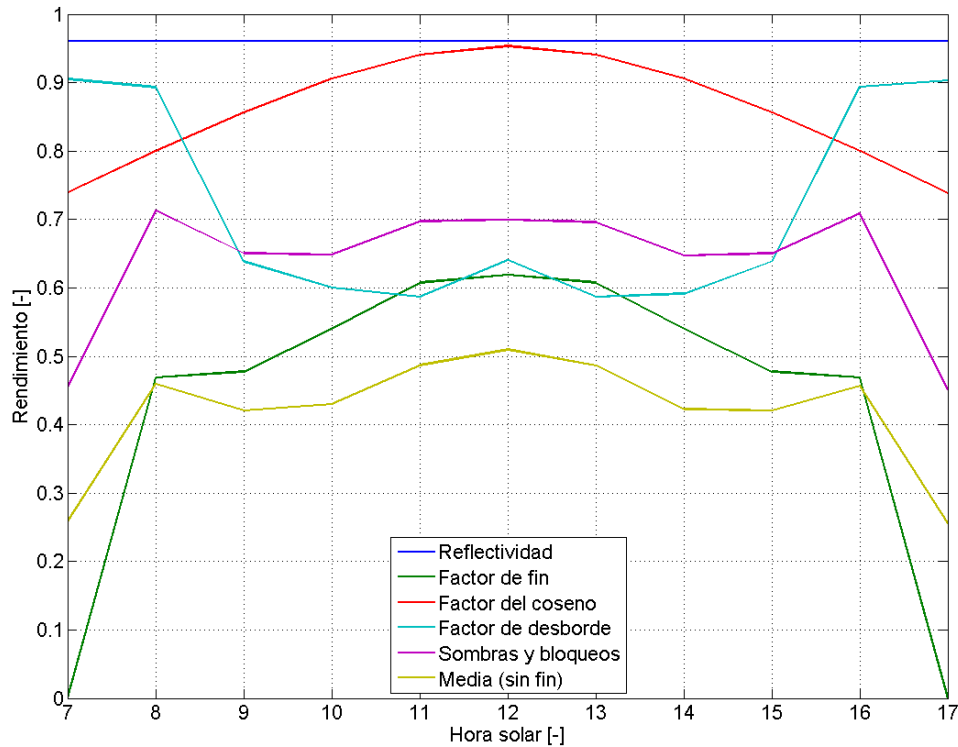


Fig. 5.9. Evolución de los factores del rendimiento óptico. Fuente: Propia

- Reflectividad: permanece constante a lo largo del día, al ser una propiedad intrínseca de los espejos no depende de la hora solar.
- Factor de fin: tomando una longitud total de 50 metros se observa que para las primeras horas del día tiene un valor nulo, ya que el recorrido horizontal de los rayos solares supera la longitud del receptor. También se aprecia que el máximo rendimiento para el factor de fin ocurre en el mediodía solar, hora en la que la elevación solar es máxima.
- Factor del coseno: es mínimo en orto y ocaso, y máximo al mediodía solar. Esto se debe a que para obtener la reflexión deseada a horas lejanas a la del mediodía la inclinación de algunos espejos disminuye el factor del coseno global del sistema, mientras que al acercarse al mediodía solar el factor del coseno de los distintos espejos son mucho más similares, incrementando así el global. Por ejemplo a las 17:00 el factor del coseno varía de 0.4232 a 0.9728 dependiendo del espejo considerado, mientras que a las 12:00 se mantiene entre 0.9005 y 0.9986.

- Factor de desborde: se observa una caída significativa entre las 8:00 y 9:00, para seguir decreciendo en menor medida hasta las 11:00 y subir ligeramente al mediodía solar.
- Sombras y bloqueos: al orto y al ocaso las sombras generadas por los espejos adyacentes son máximas, disminuyendo considerablemente el rendimiento óptico del sistema. A las 8:00 y 16:00 el rendimiento en función de las sombras y bloqueos es máximo, ya que a estas horas las sombras generadas por los espejos adyacentes han disminuido considerablemente, y las generadas por el reflector secundario no suponen grandes pérdidas, en cambio a las 9:00 y 15:00 comienza a tomar protagonismo el bloqueo por el reflector secundario. Entre las 10:00 y las 14:00 se obtiene el máximo relativo, al encontrarse el mínimo bloqueo por los espejos adyacentes.
- Rendimiento final: finalmente se obtiene la evolución del rendimiento medio a lo largo del día, considerando que la longitud del sistema es suficiente para despreciar el factor de fin y tomando en cuenta el resto de parámetros. Se observa que el rendimiento óptico medio será mínimo en el amanecer y el atardecer, y máximo en el mediodía solar, donde coinciden todos los máximos relativos de los diversos factores. Otro punto de interés ocurre a las 8:00 y 16:00 donde el rendimiento es ligeramente inferior al obtenido en el mediodía solar, aquí las sombras y bloqueos son mínimos y el factor de desborde es mucho menor que en el mediodía solar.

5.5. Análisis de costes

Finalmente interesa analizar cómo es la variación de costes entre un espejo hiperbólico y una serie de espejos planos.

Para realizar el análisis económico del reflector hiperbólico secundario se utilizan los valores económicos de PTC y LFC obtenidos en la referencia [21] y que aparecen en la tabla 2.1 y en la tabla 2.2 y la distribución de costes para Fresnel de alta eficiencia que se encuentra en [41], ya que no fue posible obtener un presupuesto de manera directa de los fabricantes de espejos especiales para aplicaciones termosolares.

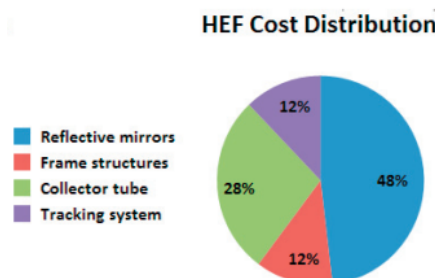


Fig. 5.10. Distribución de costes en un LFC de alta efectividad. Fuente: [41, p1343]

De este modo se obtiene que los precios por metro cuadrado de campo solar para un PTC son de 275,47 €/m² mientras que para un LFC son de 150 €/m². Estos valores toman en cuenta que el precio de los espejos es el 48 % del total (72 €/m²), el sistema de seguimiento el 12 % (18 €/m²), el colector el 28 % (42 €/m²) y la estructura el 12 % (18 €/m²). Asumiendo que los costes para todos los factores salvo los espejos se mantienen constantes en ambas tecnologías, es decir, se utiliza el mismo sistema de seguimiento, la parte de la estructura de los LFC que soporta el colector se reparte equitativamente entre todos los espejos y se ve compensada en los PTC por el soporte de su propio colector, y que los colectores a pesar de utilizar tecnologías diferentes presentan un coste similar. Finalmente se puede obtener el precio por unidad de superficie de campo solar de un espejo parabólico utilizado en PTC.

Una vez obtenido el precio de un espejo parabólico se utiliza este valor para el análisis del reflector secundario hiperbólico ideal, asumiendo que el proceso de fabricación es lo suficientemente similar para considerar que el precio del espejo hiperbólico es como mínimo igual al de un espejo parabólico para PTC. Posteriormente se utiliza el precio por unidad de superficie de espejos planos para analizar la hipérbola discretizada.

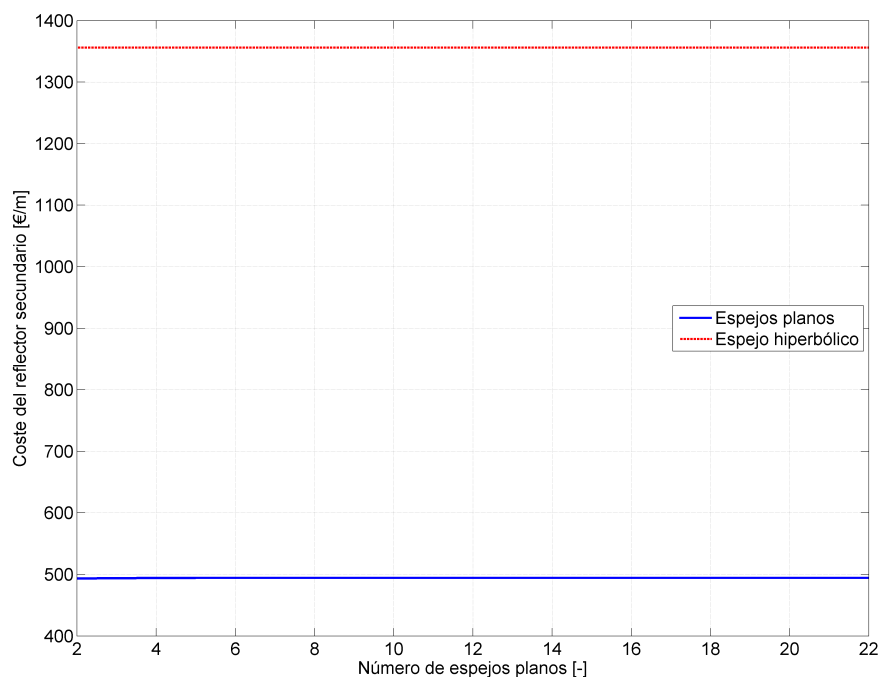


Fig. 5.11. Variación de costes con el número de espejos. Fuente: Propia

En la figura presentada se muestran los costes por unidad de longitud de la instalación para el reflector hiperbólico secundario, en función del número de espejos que lo componen. La línea discontinua roja representa el precio de el espejo hiperbólico, mientras que la línea continua azul muestra la evolución de los costes en función del número de espejos planos que componen el reflector secundario. Como en la figura anterior se aprecia poco la variación del costo al utilizar espejos planos, se presenta esto con mayor detalle en la siguiente figura.

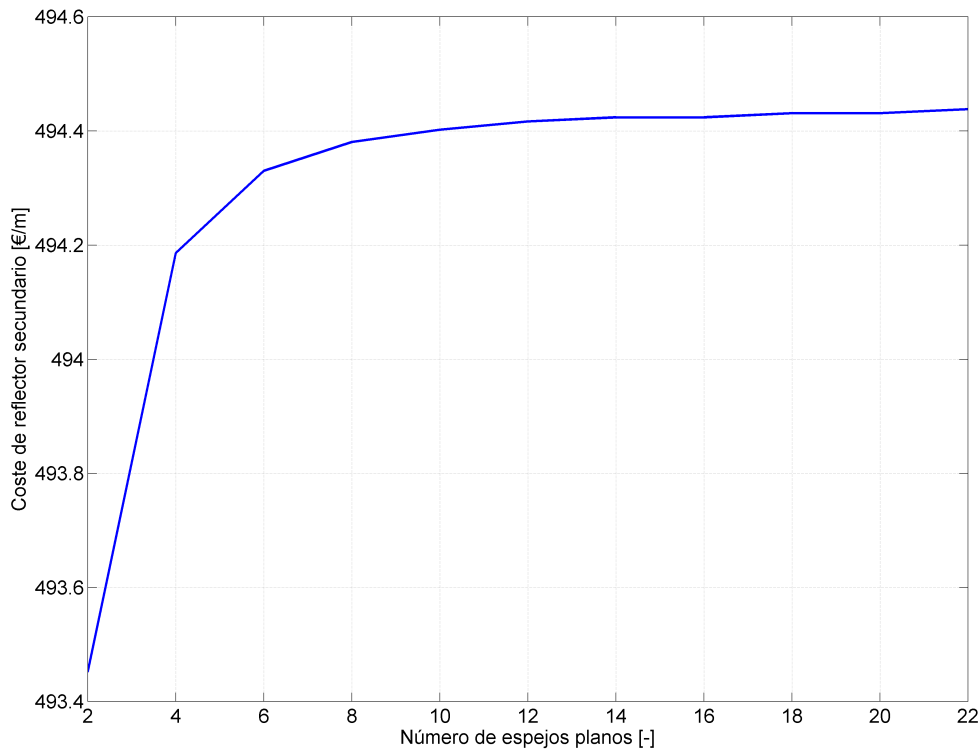


Fig. 5.12. Detalle de la variación de costes con el número de espejos. Fuente: Propia

Para el caso base estudiado, con una hipérbola cuya excentricidad tiene un valor de 0.6563 y un ancho de 6.8 metros. Se tiene que para el caso de un espejo hiperbólico, este tiene un costo por unidad de longitud de instalación de 1356.1 €/m, mientras que al discretizar la hipérbola y utilizar espejos planos los costos descienden hasta un valor cercano a los 494.5 €/m.

Al tomar la instalación de FRESDemo que tiene un coste por superficie de campo solar de 150 €/m², compuesta por 25 espejos con un ancho de 0.6 metros se obtiene un coste del campo solar por metro lineal de 2250 €/m. Sumando los valores obtenidos para los diversos casos se obtiene que para un espejo hiperbólico el coste total de la instalación por metro de longitud es de 3606.1 €/m, lo que equivale a 240.41 €/m² que sigue siendo menor que un campo solar de PTC. Para el caso de la hipérbola compuesta por diversos espejos planos el coste total de la instalación por

metro lineal pasa a ser 2744.5 €/m, que equivale a 183 €/m² valor que es mucho más cercano al coste original del campo solar LFC. Estos costes adicionales de 90 €/m² y 33 €/m² son muy inferiores a los 192 €/m² necesarios para la construcción de una torre solar.

6. CONCLUSIONES Y DISCUSIONES

6.1. Conclusiones

Una vez obtenidos los resultados lo primero que se observa es que hay una diferencia considerable entre los obtenidos mediante el modelo desarrollado en MATLAB y los obtenidos utilizando SolTrace, sin embargo en líneas generales los resultados obtenidos por ambos métodos siguen la misma tendencia en todos los análisis realizados.

Considerando que el software SolTrace es especializado en este tipo de análisis se considera que los resultados obtenidos utilizando este método son los más cercanos a la realidad. Sin embargo este programa no es particularmente fácil de utilizar cuando es necesario optimizar el sistema ya que se deben modificar todos los parámetros que definen los espejos uno por uno, por ejemplo al variar la hora solar analizada se debe cambiar la orientación de cada uno de los espejos primarios, o al analizar la excentricidad de la hipérbola que se utiliza en el reflector secundario se debe modificar la posición y la inclinación de los espejos planos que lo conforman. Tomando en cuenta estas dificultades el modelo desarrollado utilizando MATLAB resulta de gran utilidad para predimensionar el sistema y complementar con SolTrace para terminar de definirlo.

En cuanto al análisis realizado en el ámbito de la discretización de la hipérbola se determina que a partir 6 espejos planos se obtienen mejores resultados que utilizando un espejo hiperbólico, encontrando el mejor resultado posible utilizando 14 espejos planos para formar el reflector secundario con el ancho y la excentricidad predeterminadas (6.8 metros y 0.6563 respectivamente) en el campo solar con las dimensiones definidas anteriormente (24 espejos de 0.6 metros separados 0.84 metros).

Para el número de espejos definido el incremento de los costes de la instalación por unidad de longitud solo asciende 494.41 €/m lo que equivale a 182.9 €/m². Se debe recalcar que este valor sólo toma en cuenta los espejos, el precio de la estructura y del ensamblaje no se ha tomado en cuenta en el análisis, pero el precio de la estructura no varía excesivamente. En la zona superior del campo se cambia el colector por el reflector secundario, y a pesar de que el último ocupa una mayor superficie, el peso que debe soportar la estructura no varía en gran medida ya que se elimina todo el sistema del colector, que incluye el aislamiento, los conductos y el fluido calorportador. Por otro lado este sistema colector debe instalarse a un nivel cercano al de los espejos reflectores primarios, factor que incrementaría el coste de la estructura. El precio de ensamblaje también supondría un ligero aumento en los costes globales del sistema, ya que realizar un ensamblaje de diversos espejos planos

con un ancho de aproximadamente medio metro para formar una hipérbola con una forma específica no es un trabajo fácil.

Finalmente este diseño se puede considerar como una manera sencilla, económica y eficiente de incorporar el sistema de partículas como fluido calorportador, eliminando los grandes costes que implican los sistemas de torre central tanto por la construcción de la propia torre como por todo el equipamiento necesario para elevar las partículas.

Los resultados obtenidos en este proyecto de investigación han sido utilizados para presentar dos artículos en el XI Congreso Nacional y II Internacional de Ingeniería Termodinámica "11 CNIT", que se llevó a cabo en la Universidad de Castilla-La Mancha en el Campus de Albacete, entre el 12 y el 14 de Junio del presente año. Estos artículos tratan el funcionamiento de un LFC con el reflector secundario beam-down acoplado [36], y el diseño de este reflector [42].

6.2. Discusiones

Los resultados obtenidos en el desarrollo del trabajo han sido interesantes e incluso imprevistos en ciertos aspectos. En primer lugar el modelo desarrollado en MATLAB permite obtener una aproximación del flujo de calor que alcanza al receptor que resulta bastante útil en el proceso de predimensionado, ya que permite la variación de los parámetros geométricos de la instalación de manera sencilla. Por otro lado al comparar los rendimientos ópticos medios de un LFC [21] con la media de los rendimientos ópticos a lo largo del día obtenidos con el modelo de MATLAB se observa que hay una ligera disminución, pasando de 43 % a 41.88 %. Finalmente la conclusión más importante que se obtiene de este trabajo es que construir un reflector hiperbólico secundario con espejos planos no solo es más económico que utilizar un espejo especial, sino que además permite obtener mejores resultados.

Aunque esta investigación haya permitido obtener respuestas importantes en el problema de la implementación de partículas como fluido calorportador de manera económica aún quedan abundantes preguntas por responder que deben tratarse en investigaciones futuras. Primero dentro del propio sistema de beam-down presentado debe analizarse de manera más extensiva el impacto que tiene la incorporación del reflector secundario en el coste total de la instalación tomando en cuenta sobre todo los costes en la estructura del sistema y en el ensamblaje e instalación del reflector secundario, además del cambio de posición del colector. Por otro lado se debe estudiar el diseño del colector de partículas en lecho fluidizado de manera que se pueda incorporar de manera adecuada en el campo solar, analizando también el impacto económico que tiene incorporar esta tecnología en el mismo para obtener los costes definitivos que conllevaría construir una instalación de este estilo.

Finalmente se puede asegurar que los resultados obtenidos en este trabajo de investigación suponen un avance en cuanto a las mejoras posibles para las instalaciones de generación termosolar de tipo Fresnel, para continuar con la tendencia actual de generación de energía utilizando fuentes renovables y disminuir las emisiones de CO₂ para tener un planeta más limpio en el futuro.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] “*Informe del Sistema Eléctrico Español 2017 — Red Eléctrica de España*”, Ree.es, 2019. [Online]. Available: <https://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/informe-anual/informe-del-sistema-electrico-espanol-2017>. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [2] “*Protocolo de Kioto*”, Es.wikipedia.org, 2019. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_Kioto#Segundo_periodo_del_Protocolo_de_Kioto. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [3] “*Acuerdo de París*”, Es.wikipedia.org, 2019. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Acuerdo_de_Par%C3%ADs. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [4] “*Estrategia a largo plazo para 2050 - Acción por el Clima - European Commission*”, Acción por el Clima - European Commission, 2019. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_es. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [5] “*3.5. Regulación española de las energías renovables — Energía y Sociedad*”, Energiaysociedad.es, 2019. [Online]. Available: <http://www.energiaysociedad.es/manenergia/3-5-regulacion-espanola-de-las-energias-renovables/>. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [6] J. Duffie and W. Beckman, “*Solar Engineering of Thermal Processes*”. Somerset: Wiley, 2013.
- [7] Re.jrc.ec.europa.eu, 2019. [Online]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis5/tmy.html#cont4>. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [8] Departamento de Ingeniería Térmica y Fluidos, “*Máquinas y Centrales Térmicas*”. Transparencias Docentes, Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2019.
- [9] “*Parabolic trough power plant Andasol III*”, Sbp.de, 2019. [Online]. Available: <https://www.sbp.de/en/project/parabolic-trough-power-plant-andasol-iii/>. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [10] “*Visita a la Central Termosolar Andasol 3 en La Calahorra – IES Zaidín – Vergeles*”, Ieszaidinvergeles.org, 2019. [Online]. Available: <https://www.ieszaidinvergeles.org/blog/?p=644>. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [11] “*Abengoa :: Negocio :: Energía :: Termosolar*”, Abengoa.es, 2019. [Online]. Available: <http://www.abengoa.es/web/es/negocio/energia/termosolar/>. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [12] “*LEMCO Structural Steel Specialists - Khi Solar One Plant*”, LEMCO, 2019. [Online]. Available: <https://www.lemco.co.za/our-projects/steel-structures-khi-solar-one-plant-renewable-energy/>. [Accessed: 10- Jun- 2019].

- [13] S. Garrido, “*Centrales de D.Parabólico (Stirling)*”, Centralestermosolares.com, 2019. [Online]. Available: <http://www.centralestermosolares.com/centrales-de-d-parabolico-stirling>. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [14] “*Stirling, un motor cuyo 'combustible' es sólo calor*”, Híbridos y Eléctricos, 2019. [Online]. Available: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/stirling-un-motor-cuyo-combustible-es-solo-calor/20130226180646004970.html>. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [15] “*Solar Concentrator with Solar Stirling Engine — Solartron*”, Solartron, 2019. [Online]. Available: <https://www.solartronenergy.com/applications/electricity-stirling-engine-with-solar-concentrator/>. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [16] C. K. Ho, “*Advances in central receivers for concentrating solar applications*”, *Solar Energy*, vol. 152, pp. 38-56, 2017.
- [17] G. Zhu, T. Wendelin, M. J. Wagner, C. Kutscher, “*History, current state, and future of linear Fresnel concentrating solar collectors*”, *Solar Energy*, vol. 103, pp. 639-652, 2014.
- [18] M. J. Montes, C. Rubbia, R. Abbas, J. M. Martínez-Val, “*A comparative analysis of configurations of linear Fresnel collectors for concentrating solar power*”, *Energy*, vol. 73, pp. 192-203, 2014.
- [19] S. Balaji, K. S. Reddy, T. Sundararajan, “*Optical modelling and performance analysis of a solar LFR receiver system with parabolic and involute secondary reflectors*”, *Applied Energy*, vol. 179, pp. 1138-1151, 2016.
- [20] G. Zhu, “*New adaptative method to optimize the secondary reflector of linear Fresnel collectors*”, *Solar Energy*, vol. 144, pp.117-126, 2017.
- [21] G. Morin, J. Dersch, W. Platzer, M. Eck, A. Häberle, “*Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Trough Collector power plants*”, *Solar Energy*, vol. 86, pp. 1-12, 2012.
- [22] N. El Gharbi, H. Derbal, S. Bouaichaoui, N. Said, “*A comparative study between parabolic trough collector and linear Fresnel reflector technologies*”, *Energy Procedia*, vol. 6, pp. 565-572, 2011.
- [23] M. Moran, M. Moran, H. Shapiro, D. Boettner and M. Bailey, “*Fundamentals of engineering thermodynamics*”.
- [24] J. Cañada, “*Manual de energía solar térmica. Diseño y cálculo de instalaciones*”, 2008.
- [25] J. F. Feldhoff, “*Linear Fresnel Collectors: A Technology Overview*”, June 2012.

- [26] F. Rinaldi, M. Binotti, A. Giostri, G. Manzolini, “*Comparison of linear and point focus collectors in solar power plants*”, *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 1491-1500, 2014.
- [27] R. Dunn, P. Hearps and M. Wright, “*Molten-Salt Power Towers: Newly Commercial Concentrating Solar Storage*”, Semantic Scholar.org, 2019. [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Molten-Salt-Power-Towers-Newly-Commercial-Solar-Dunn-Hearps/dd46d0ced5f44ac4a506d7ab2c03bf7b74e3bd1e>. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [28] R. Abbas, J. Muñoz-Antón, M. Valdés, J. M. Martínez-Val, “*High concentration linear Fresnel reflectors*”, *Energy Conversion and Management*, vol. 72, pp. 60-68, 2013.
- [29] J. Gómez-Hernández, P. A. González-Gómez, T. Ni-Song, J. V. Briongos, D. Santana, “*Design of a Solar Linear Particle Receiver Placed at the Ground Level*”, SolarPACES, 2017.
- [30] “*Sección cónica*”, Es.wikipedia.org, 2019. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Secci%C3%B3n_c%C3%B3nica#/media/File:Cono_y_secciones.svg. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [31] “*Concepto de hipérbola y sus elementos*,” 2019. [Online]. Available: <https://www.cecyl3.ipn.mx/ibiblioteca/mundodelasmaticas/ConceptoDeHiperbolaYSusElementos.html>. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [32] “*Regression Analysis: How Do I Interpret R-squared and Assess the Goodness-of-Fit?*”, Blog.minitab.com, 2019. [Online]. Available: <https://blog.minitab.com/blog/adventures-in-statistics-2/regression-analysis-how-do-i-interpret-r-squared-and-assess-the-goodness-of-fit>. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [33] “*R-square: The coefficient of determination - File Exchange - MATLAB Central*”, Es.mathworks.com, 2019. [Online]. Available: <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34492-r-square-the-coefficient-of-determination>. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [34] “*MathWorks - Makers of MATLAB and Simulink*”, Mathworks.com, 2019. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com>. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [35] “*Óptica básica*”, Google Books, 2019. [Online]. Available: <https://books.google.es/books?id=TqASDQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=fisica+optica&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwim9OiKwFXhAhUP1xoKHUArALIQ6AEIOjAD#v=onepage&q&f=false>. [Accessed: 10- Jun- 2019].
- [36] D. Gómez-González, S. Taramona, J. V. Briongos, J. Gómez-Hernández, “*Study of a linear Beam-down reflector coupled with a Fresnel solar field*”, 11 CNIT, 2019.

[37] T. Wendelin, A. Dobos, A. Lewandowski, “*SolTrace: A Ray-Tracing Code for Complex Solar Optical Systems*”, NREL, 2013.

[38] “*What is Monte Carlo Simulation?*”, Monte Carlo Simulation: What Is It and How Does It Work? - Palisade, 2019. [Online]. Available: https://www.palisade.com/risk/monte_carlo_simulation.asp. [Accessed: 10- Jun- 2019].

[39] “*Zernike polynomials*”, En.wikipedia.org, 2019. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Zernike_polynomials. [Accessed: 10- Jun- 2019].

[40] L. Vant-Hull, “*Issues with beam-down concepts*”, *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 257-264, 2014.

[41] R. Gabrielli, P. Castrataro, F. Del Medico, M. Di Palo, B. Lenzo, “*Levelized cost of heat for linear Fresnel concentrated solar systems*”, *Energy Procedia*, vol. 49, pp. 1340-1349, 2014.

[42] S. Taramona, J. Gómez-Hernández, “*Designing a linear beam-down secondary concentrator*”, 11 CNIT, 2019.

ANEXO A. CÓDIGO DEL MODELO EN MATLAB

```
1  %%%%%%%%% Rendimiento Optico %%%%%%%%%
2  clc
3  clear all
4  hold on
5
6
7  %% DATOS A INTRODUCIR
8
9  prec=0.01; % Precision deseada, mientras menor el numero, mas
    preciso el resultado [0.01]
10
11  DNI=1000; %W/m2
12
13  % DATOS POSICION Y TIEMPO
14
15  lat=38.2709509; % Latitud [en este caso Murcia]
16
17  nd=80; % Dia del ano [ n=80 es el dia representativo de todo el
    ano] 21 de marzo
18
19  t=12; % Hora en formato militar (24h)
20
21  ang_diam=0.5422222; %32'32''
22  SS_D=ang_diam/2;
23  % DATOS HIPERBOLA
24
25  % Focos
26  F1=0;
27  F2=8;
28
29  exc=0.6563; % Excentricidad -> 0.6563
30
31  x_width=6.8; % Ancho -> 6.8
32
33  divisiones=4; % Numero de espejos a cada lado del eje de
    simetria de la hip -> 4
34
35
36  % DATOS ESPEJOS
37
38  w_e=0.6; % Ancho -> 0.6
39
40  l_e=50; % Longitud
41
42  nepl=12; % Numero de espejos a cada lado del receptor
```

```

43
44 x_c_esp=0.84; % Separacion entre centros de espejos (mayor que
    w_e)
45
46
47 % DATOS RECEPTOR
48
49 w_rec=1.08; % Ancho
50
51 y_rec=0; % Altura
52
53
54
55 %% Angulos solares
56
57
58 % Declinacion
59
60 dec=23.45*sind(360*(284+nd)/365);
61
62 % Angulo Horario
63
64 w=15*(t-12);
65
66 % Angulo Cenital
67
68 a_cenit=acosd((cosd(lat)*cosd(dec)*cosd(w))+(sind(lat)*sind(dec)
    ));
69
70 % Angulo Acimutal
71
72 if w>=0
73     a_az=abs(acosd(((cosd(a_cenit)*sind(lat))-sind(dec))/(sind(
        a_cenit)*cosd(lat)))));
74 else
75     a_az=-abs(acosd(((cosd(a_cenit)*sind(lat))-sind(dec))/(sind(
        a_cenit)*cosd(lat)))));
76 end
77
78 % Angulo Transversal
79
80 a_trans=atand((sind(a_az))/tand(90-a_cenit));
81
82 a_pp=a_trans+90;
83
84 % Elevacion Solar
85
86 a_elev=90-a_cenit;
87
88
89 %% Hiperbola

```

```

90 q=0;
91 k=0;
92 y_aimo=-1;
93
94 % Parametros Hiperbola ideal
95
96 c=(F2-F1)/2;
97
98 a=(exc-0.5)*2*c;
99 b=sqrt((c^2)-(a^2));
100
101
102 % Ancho Hiperbola
103
104 xnég=-x_width/2;
105 xpos=x_width/2;
106 paso=x_width/(divisiones*2);
107
108
109 for xi=xnég:paso:xpos
110     k=k+1; %Mantendremos k reservada para relaciones de la
           hiperbola
111     xhip(k)=xi;
112     yhip(k)=c+sqrt((a^2)+(a*xi/b)^2);
113 end
114
115 min_hip=yhip((k+1)/2);
116
117 for i=1:k-1
118     hip_aim(i)=(atand((yhip(i+1)-yhip(i))/(xhip(i+1)-xhip(i))))
           -90;
119     vec_hip_aim(i,1)=cosd(hip_aim(i));
120     vec_hip_aim(i,2)=sind(hip_aim(i));
121 end
122
123 htapa=yhip(1);
124 plot(xhip,yhip,'k')
125 plot([xnég,xpos],[htapa,htapa],'k')
126
127 xprim=xhip';
128 yprim=yhip';
129 xn = (xnég:0.01:xpos)';
130 yn = interp1q(xprim,yprim,xn);
131
132 for xi=xnég:0.01:xpos
133     q=q+1;
134     x_id(q)=xi;
135     y_id(q)=c+sqrt((a^2)+(a*xi/b)^2);
136 end
137
138 y=yn;

```



```

139 f=y_id';
140
141 R2=rsquare(y,f);
142
143 R2
144
145 h_esp_media=(htapa+min_hip)/2;
146
147 %% Geometria Espejos
148
149
150 % Angulo de reflexion
151
152 n_esp=2*nepl; %[NUMERO ESPEJOS]
153
154
155 for i=1:n_esp
156     if i<(nepl+1)
157         x_esp(i)=-(n_esp/2*x_c_esp)+(x_c_esp*(i-1));
158     else
159         x_esp(i)=x_c_esp*(i-nepl);
160     end
161 end
162
163 y_foco=F2*ones(n_esp,1);
164
165 a_ref=(atan(y_foco./x_esp'))*180/pi;
166
167 for i=1:n_esp;
168
169     if a_ref(i)>0;
170         a_ref(i)=180-a_ref(i);
171     end
172 end
173
174 a_ref=abs(a_ref);
175
176
177 % Calculo Normal Espejo
178
179 n_aim=zeros(n_esp,1);
180
181 for j=1:n_esp
182
183     if a_pp~=90
184         if a_ref(j)<a_pp
185             g(j)=(a_pp-a_ref(j))/2;
186             n_aim(j)=a_ref(j)+g(j);
187         else
188             g(j)=(a_ref(j)-a_pp)/2;
189             n_aim(j)=a_pp+g(j);

```

```

190         end
191
192
193     else a_pp==90
194         for i=1:n_esp
195             if x_esp(i)<0
196                 g(i)=(a_ref(i)-a_pp)/2;
197                 n_aim(i)=a_pp+g(i);
198             elseif x_esp(i)>0
199                 g(i)=(a_pp-a_ref(i))/2;
200                 n_aim(i)=a_ref(i)+g(i);
201             end
202         end
203
204     end
205 end
206
207
208
209     alf_esp=n_aim-90;
210
211
212
213     for i=1:n_esp
214
215         xesizq(i)=x_esp(i)-(w_e/2)*cosd(alf_esp(i));
216         xesder(i)=x_esp(i)+((w_e/2)*cosd(alf_esp(i)));
217
218         yesizq(i)=-sind(alf_esp(i))*w_e/2;
219         yesder(i)=sind(alf_esp(i))*w_e/2;
220
221     end
222
223
224     xes=[xesizq',xesder'];
225     yes=[yesizq',yesder'];
226
227
228
229     for i=1:n_esp
230         plot(xes(i,:),yes(i,:), 'k')
231     end
232
233     vec_nor=[cosd(n_aim),sind(n_aim)];
234     vec_ref=[cosd(a_ref),sind(a_ref)];
235
236     for i=1:n_esp
237         cosalf_1(i)=(vec_nor(i,1)*vec_ref(i,1))+(vec_nor(i,2)*
                vec_ref(i,2));
238     end
239

```

```

240 %% Receptor
241
242
243 plot([-w_rec/2,+w_rec/2],[y_rec, y_rec],'k')
244 plot([-w_rec/2,-w_rec/2+0.25],[y_rec,y_rec-0.25],'k')
245 plot([+w_rec/2,+w_rec/2-0.25],[y_rec,y_rec-0.25],'k')
246 plot([-w_rec/2+0.25,+w_rec/2-0.25],[y_rec-0.25,y_rec-0.25],'k')
247 plot([0,0],[-2,y_rec-0.25],'k')
248
249
250 % Soportes
251
252 for i=1:n_esp
253     plot([x_esp(i),x_esp(i)],[0,-2],'k')
254 end
255
256
257 %% Rayos solares
258
259 y3sol=htapa;
260 y4sol=-2;
261
262
263
264
265 %% Rayos directos al receptor
266
267 ctr=1;
268
269 x_ray_ref_1=(-w_rec/2)+(-tand(a_trans)*(htapa-y_rec));
270 x_ray_ref_u=(+w_rec/2)+(-tand(a_trans)*(htapa-y_rec));
271 x1esp=-w_rec/2;
272 x2esp=+w_rec/2;
273 y1esp=y_rec;
274 y2esp=y_rec;
275
276
277
278 xepi=xes(nepl,1);
279 xepd=xes(nepl,2);
280 yepi=yes(nepl,1);
281 yepd=yes(nepl,2);
282
283 xeni=xes(nepl+1,1);
284 xend=xes(nepl+1,2);
285 yeni=yes(nepl+1,1);
286 yend=yes(nepl+1,2);
287
288 lim_sn=xes(nepl+1,1);
289
290 if x_ray_ref_u<xneg

```

```

291         for x3sol=x_ray_ref_1:prec:x_ray_ref_u
292
293             x4sol=x3sol-(-tand(a_trans)*(y3sol-y4sol));
294
295             % Bloqueo por espejos
296             %Previous
297             PxBRp((((xepi*yepd)-(yepi*xepd))*(x3sol-x4sol))
298                 -((xepi-xepd)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))
299                 /...
300                 (((xepi-xepd)*(y3sol-y4sol))-((yepi-yepd)*(x3sol
301                 -x4sol))));
302
303             %Next
304             PxBRn((((xeni*yend)-(yeni*xend))*(x3sol-x4sol))
305                 -((xeni-xend)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))
306                 /...
307                 (((xeni-xend)*(y3sol-y4sol))-((yeni-yend)*(x3sol
308                 -x4sol))));
309
310             if PxBRp>xepd && PxBRn<xeni
311
312                 PxR(ctr)=((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))*(x3sol-
313                     x4sol))-((x1esp-x2esp)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*
314                     x4sol)))/...
315                     (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-y2esp)*(
316                     x3sol-x4sol))));
317
318                 PyR(ctr)=((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))*(y3sol-
319                     y4sol))-((y1esp-y2esp)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*
320                     x4sol)))/...
321                     (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-y2esp)*(
322                     x3sol-x4sol))));
323
324                 plot([x3sol,PxR(ctr)],[y3sol,PyR(ctr)],'y')
325
326                 ctr=ctr+1;
327
328             end
329         end
330
331     elseif x_ray_ref_1<xneg && x_ray_ref_u>xneg
332
333         for x3sol=x_ray_ref_1:prec:xneg
334
335             x4sol=x3sol-(-tand(a_trans)*(y3sol-y4sol));
336
337             % Bloqueo por espejos
338             %Previous

```

```

330     PxBRp((((xepi*yepd)-(yepi*xepd))*(x3sol-x4sol))
          -((xepi-xepd)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))
          /...
331     (((xepi-xepd)*(y3sol-y4sol))-((yepi-yepd)*(x3sol
          -x4sol))));
332
333     %Next
334     PxBRn((((xeni*yend)-(yeni*xend))*(x3sol-x4sol))
          -((xeni-xend)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))
          /...
335     (((xeni-xend)*(y3sol-y4sol))-((yeni-yend)*(x3sol
          -x4sol))));
336
337
338     if PxBRp>xepd && PxBRn<xeni
339
340         PxR(ctr)((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))*(x3sol-
          x4sol))-((x1esp-x2esp)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*
          x4sol)))/...
341         (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-y2esp)*(
          x3sol-x4sol))));
342
343         PyR(ctr)((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))*(y3sol-
          y4sol))-((y1esp-y2esp)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*
          x4sol)))/...
344         (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-y2esp)*(
          x3sol-x4sol))));
345
346         plot([x3sol,PxR(ctr)],[y3sol,PyR(ctr)],'y')
347
348         ctr=ctr+1;
349
350     end
351 end
352
353
354 elseif x_ray_ref_1<xpos && x_ray_ref_u>xpos
355
356     for x3sol=xpos:prec:x_ray_ref_u
357
358         x4sol=x3sol-(-tand(a_trans)*(y3sol-y4sol));
359
360         % Bloqueo por espejos
361         %Previous
362         PxBRp((((xepi*yepd)-(yepi*xepd))*(x3sol-x4sol))
          -((xepi-xepd)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))
          /...
363         (((xepi-xepd)*(y3sol-y4sol))-((yepi-yepd)*(x3sol
          -x4sol))));
364
365         %Next

```

```

366         PxBRn((((xeni*yend)-(yeni*xend))*(x3sol-x4sol))
              -((xeni-xend)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))
              /...
367         (((xeni-xend)*(y3sol-y4sol))-((yeni-yend)*(x3sol
              -x4sol))));
368
369
370     if PxBRp>xepd && PxBRn<xeni
371
372         PxR(ctr)=((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))*(x3sol-
              x4sol))-((x1esp-x2esp)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*
              x4sol)))/...
373         (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-y2esp)*(
              x3sol-x4sol))));
374
375         PyR(ctr)=((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))*(y3sol-
              y4sol))-((y1esp-y2esp)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*
              x4sol)))/...
376         (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-y2esp)*(
              x3sol-x4sol))));
377
378         plot([x3sol,PxR(ctr)],[y3sol,PyR(ctr)],'y')
379
380         ctr=ctr+1;
381
382
383     end
384 end
385
386
387 elseif x_ray_ref_1>xpos
388
389     for x3sol=x_ray_ref_1:prec:x_ray_ref_u
390
391         x4sol=x3sol-(-tand(a_trans)*(y3sol-y4sol));
392
393         % Bloqueo por espejos
394         %Previous
395         PxBRp((((xepi*yepd)-(yepi*xepd))*(x3sol-x4sol))
              -((xepi-xepd)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))
              /...
396         (((xepi-xepd)*(y3sol-y4sol))-((yepi-yepd)*(x3sol
              -x4sol))));
397
398         %Next
399         PxBRn((((xeni*yend)-(yeni*xend))*(x3sol-x4sol))
              -((xeni-xend)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))
              /...
400         (((xeni-xend)*(y3sol-y4sol))-((yeni-yend)*(x3sol
              -x4sol))));
401

```

```

402
403         if PxBRp>xepd && PxBRn<xeni
404
405             PxR(ctr)=((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))*(x3sol-
                     x4sol))-((x1esp-x2esp)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*
                     x4sol))))/...
406             (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-y2esp)*(
                     x3sol-x4sol)));
407
408             PyR(ctr)=((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))*(y3sol-
                     y4sol))-((y1esp-y2esp)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*
                     x4sol))))/...
409             (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-y2esp)*(
                     x3sol-x4sol)));
410
411             plot([x3sol,PxR(ctr)],[y3sol,PyR(ctr)],'y')
412
413             ctr=ctr+1;
414
415         end
416     end
417 end
418
419 % Sun Shape
420
421 ctr_d=ctr;
422
423 if ctr~=1
424
425     for OPR_d=1:ctr_d-1
426
427         if a_trans>0
428             xOPRd_sol(OPR_d)=PxR(OPR_d)-(tand(a_trans+SS_D)*(y3sol-
                     y_rec));
429         else
430             xOPRd_sol(OPR_d)=PxR(OPR_d)-(tand(a_trans+SS_D)*(y3sol-
                     y_rec));
431         end
432         if xOPRd_sol(OPR_d)>xpos || xOPRd_sol(OPR_d)<xneg
433
434             ctr=ctr+1;
435             plot([xOPRd_sol(OPR_d),PxR(OPR_d)],[y3sol,y_rec],'y')
436
437         end
438     end
439 end
440
441     for OPR_i=1:ctr_d-1
442
443         if a_trans>0

```

```

444         xOPRi_sol(OPR_i)=PxR(OPR_i)-(tand(a_trans-SS_D)*(y3sol-
           y_rec));
445     else
446         xOPRi_sol(OPR_i)=PxR(OPR_i)-(tand(a_trans-SS_D)*(y3sol-
           y_rec));
447     end
448     if xOPRi_sol(OPR_i)>xpos || xOPRi_sol(OPR_i)<xneg
449
450         ctr=ctr+1;
451         plot([xOPRi_sol(OPR_i),PxR(OPR_i)], [y3sol,y_rec], 'y')
452
453     end
454
455 end
456
457
458
459 end
460
461 %% Rayos Espejos
462
463
464 ct=1;
465
466 for i=1:n_esp % cada uno de los espejos
467
468     Px_rec_min(i)=10;
469     Px_rec_max(i)=-10;
470
471     hit(i)=0;
472     miss(i)=0;
473
474     x1esp=xes(i,1);
475     x2esp=xes(i,2);
476     y1esp=yes(i,1);
477     y2esp=yes(i,2);
478
479
480
481
482     % x a la altura de la tapa
483     x_ray_1=xes(i,1)+(-tand(a_trans)*(htapa-yes(i,1)));
484     x_ray_u=xes(i,2)+(-tand(a_trans)*(htapa-yes(i,2)));
485
486
487
488     %Primera interseccion
489
490
491     if x_ray_u<xneg
492

```



```

493     for x3sol=x_ray_1:prec:x_ray_u
494
495         x4sol=x3sol-(-tand(a_trans)*(y3sol-y4sol));
496         bl_c=0;
497
498         %Bloqueo por receptor
499
500         Px1R(((((-w_rec/2)*y_rec)-(y_rec*(w_rec/2)))*(x3sol
501             -x4sol))-(((w_rec/2)-(w_rec/2))*((x3sol*y4sol)-(
502             y3sol*x4sol))))/...
503             ((((-w_rec/2)-(w_rec/2))*(y3sol-y4sol))-((y_rec-
504             y_rec)*(x3sol-x4sol)));
505
506         if Px1R<(w_rec/2) && a_pp>90 && i>nepl
507             bl_rec=1;
508         elseif Px1R>(-w_rec/2) && a_pp<90 && i<(nepl+1)
509             bl_rec=1;
510         else
511             bl_rec=0;
512         end
513
514         if bl_rec==0
515
516             %Bloqueo por otros espejos
517
518             if i==1 && a_pp<90
519
520                 x1espn=xes(i+1,1);
521                 x2espn=xes(i+1,2);
522                 y1espn=yes(i+1,1);
523                 y2espn=yes(i+1,2);
524
525                 Px1BN((((x1espn*y2espn)-(y1espn*x2espn)
526                     )*(x3sol-x4sol))-((x1espn-x2espn)
527                     *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
528                 (((x1espn-x2espn)*(y3sol-y4sol))-((
529                     y1espn-y2espn)*(x3sol-x4sol)));
530
531                 if Px1BN>x1espn
532                     bl_c=1;
533                 else
534                     bl_c=0;
535                 end
536
537             elseif i==n_esp && a_pp>90
538
539                 x1espp=xes(i-1,1);
540                 x2espp=xes(i-1,2);
541                 y1espp=yes(i-1,1);
542                 y2espp=yes(i-1,2);

```

```

538
539         Px1BP=((((x1espp*y2espp)-(y1espp*x2espp
540             ))*(x3sol-x4sol))-((x1espp-x2espp)
541                 *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
542         (((x1espp-x2espp)*(y3sol-y4sol))-((
543             y1espp-y2espp)*(x3sol-x4sol)));
544
545         if Px1BP<x2espp
546             bl_c=1;
547         else
548             bl_c=0;
549         end
550
551     elseif i~=1 && i~=n_esp
552
553         x1espn=xes(i+1,1);
554         x2espn=xes(i+1,2);
555         y1espn=yes(i+1,1);
556         y2espn=yes(i+1,2);
557
558         x1espp=xes(i-1,1);
559         x2espp=xes(i-1,2);
560         y1espp=yes(i-1,1);
561         y2espp=yes(i-1,2);
562
563         Px1BN((((x1espn*y2espn)-(y1espn*x2espn
564             ))*(x3sol-x4sol))-((x1espn-x2espn)
565                 *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
566         (((x1espn-x2espn)*(y3sol-y4sol))-((
567             y1espn-y2espn)*(x3sol-x4sol)));
568
569         Px1BP((((x1espp*y2espp)-(y1espp*x2espp
570             ))*(x3sol-x4sol))-((x1espp-x2espp)
571                 *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
572         (((x1espp-x2espp)*(y3sol-y4sol))-((
573             y1espp-y2espp)*(x3sol-x4sol)));
574
575         if a_pp>90
576             if Px1BP<x2espp
577                 bl_c=1;
578             else
579                 bl_c=0;
580             end
581         else
582             if Px1BN>x1espn
583                 bl_c=1;
584             else
585                 bl_c=0;
586             end
587         end
588     end
589
590

```

```

580         end
581
582         if bl_c~=1;
583
584             Px1(ct)=((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))
                    *(x3sol-x4sol))-((x1esp-x2esp)*((
                    x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
585             (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-
                    y2esp)*(x3sol-x4sol)));
586
587             Py1(ct)=((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))
                    *(y3sol-y4sol))-((y1esp-y2esp)*((
                    x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
588             (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-
                    y2esp)*(x3sol-x4sol)));
589
590             plot([x3sol,Px1(ct)],[y3sol,Py1(ct)],'
                    y')
591
592             ct=ct+1;
593         end
594     end
595
596 end
597
598 elseif x_ray_1<xneg && x_ray_u>xneg
599
600     for x3sol=x_ray_1:prec:xneg
601
602         x4sol=x3sol-(-tand(a_trans)*(y3sol-y4sol));
603         bl_c=0;
604
605         %Bloqueo por receptor
606
607         Px1R(((((-w_rec/2)*y_rec)-(y_rec*(w_rec/2)))*(x3sol
                    -x4sol))-(((w_rec/2)-(w_rec/2))*((x3sol*y4sol)-(
                    y3sol*x4sol))))/...
608         ((((-w_rec/2)-(w_rec/2))*(y3sol-y4sol))-((y_rec-
                    y_rec)*(x3sol-x4sol)));
609
610         if Px1R<(w_rec/2) && a_pp>90 && i>nepl
611             bl_rec=1;
612         elseif Px1R>(-w_rec/2) && a_pp<90 && i<(nepl+1)
613             bl_rec=1;
614         else
615             bl_rec=0;
616         end
617
618         if bl_rec==0
619
620             %Bloqueo por otros espejos

```

```

621         if i==1 && a_pp<90
622
623             x1espn=xes(i+1,1);
624             x2espn=xes(i+1,2);
625             y1espn=yes(i+1,1);
626             y2espn=yes(i+1,2);
627
628             Px1BN((((x1espn*y2espn)-(y1espn*x2espn)
629                 )*(x3sol-x4sol))-((x1espn-x2espn)
630                 *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
631             (((x1espn-x2espn)*(y3sol-y4sol))-((
632                 y1espn-y2espn)*(x3sol-x4sol)));
633
634             if Px1BN>x1espn
635                 bl_c=1;
636             else
637                 bl_c=0;
638             end
639
640         elseif i==n_esp && a_pp>90
641
642             x1espp=xes(i-1,1);
643             x2espp=xes(i-1,2);
644             y1espp=yes(i-1,1);
645             y2espp=yes(i-1,2);
646
647             Px1BP((((x1espp*y2espp)-(y1espp*x2espp)
648                 )*(x3sol-x4sol))-((x1espp-x2espp)
649                 *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
650             (((x1espp-x2espp)*(y3sol-y4sol))-((
651                 y1espp-y2espp)*(x3sol-x4sol)));
652
653             if Px1BP<x2espp
654                 bl_c=1;
655             else
656                 bl_c=0;
657             end
658
659         elseif i~=1 && i~=n_esp
660
661             x1espn=xes(i+1,1);
662             x2espn=xes(i+1,2);
663             y1espn=yes(i+1,1);
664             y2espn=yes(i+1,2);
665
666             x1espp=xes(i-1,1);
667             x2espp=xes(i-1,2);
668             y1espp=yes(i-1,1);
669             y2espp=yes(i-1,2);

```

```

665         Px1BN((((x1espn*y2espn)-(y1espn*x2espn
666             ))*(x3sol-x4sol))-((x1espn-x2espn)
667             *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
668         (((x1espn-x2espn)*(y3sol-y4sol))-((
669             y1espn-y2espn)*(x3sol-x4sol)));
670
671         Px1BP((((x1espp*y2espp)-(y1espp*x2espp
672             ))*(x3sol-x4sol))-((x1espp-x2espp)
673             *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
674         (((x1espp-x2espp)*(y3sol-y4sol))-((
675             y1espp-y2espp)*(x3sol-x4sol)));
676
677         if a_pp>90
678             if Px1BP<x2espp
679                 bl_c=1;
680             else
681                 bl_c=0;
682             end
683         else
684             if Px1BN>x1espn
685                 bl_c=1;
686             else
687                 bl_c=0;
688             end
689         end
690
691         if bl_c~=1;
692
693         Px1(ct)=((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))*(x3sol-x4sol
694             ))-((x1esp-x2esp)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))
695         /...
696         (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-y2esp)*(
697             x3sol-x4sol)));
698
699         Py1(ct)=((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))*(y3sol-y4sol
700             ))-((y1esp-y2esp)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))
701         /...
702         (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-y2esp)*(
703             x3sol-x4sol)));
704
705         plot([x3sol,Px1(ct)],[y3sol,Py1(ct)],'y')
706
707         ct=ct+1;
708     end
709 end
710
711 elseif x_ray_1<xpos && x_ray_u>xpos

```

```

704
705     for x3sol=xpos:prec:x_ray_u
706
707         x4sol=x3sol-(-tand(a_trans)*(y3sol-y4sol));
708         bl_c=0;
709         %Bloqueo por receptor
710
711         Px1R(((((-w_rec/2)*y_rec)-(y_rec*(w_rec/2)))*(x3sol
712             -x4sol))-(((w_rec/2)-(w_rec/2))*((x3sol*y4sol)-(
713             y3sol*x4sol)))))/...
714             ((((-w_rec/2)-(w_rec/2))*(y3sol-y4sol))-((y_rec-
715             y_rec)*(x3sol-x4sol)));
716
717         if Px1R<(w_rec/2) && a_pp>90 && i>nepl
718             bl_rec=1;
719         elseif Px1R>(-w_rec/2) && a_pp<90 && i<(nepl+1)
720             bl_rec=1;
721         else
722             bl_rec=0;
723         end
724
725         if bl_rec==0
726
727             %Bloqueo por otros espejos
728
729             if i==1 && a_pp<90
730
731                 x1espn=xes(i+1,1);
732                 x2espn=xes(i+1,2);
733                 y1espn=yes(i+1,1);
734                 y2espn=yes(i+1,2);
735
736                 Px1BN((((x1espn*y2espn)-(y1espn*x2espn)
737                     ))*(x3sol-x4sol))-((x1espn-x2espn)
738                     *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol)))))/...
739                     (((x1espn-x2espn)*(y3sol-y4sol))-((
740                     y1espn-y2espn)*(x3sol-x4sol)));
741
742                 if Px1BN>x1espn
743                     bl_c=1;
744                 else
745                     bl_c=0;
746                 end
747
748             elseif i==n_esp && a_pp>90
749
750                 x1espp=xes(i-1,1);
751                 x2espp=xes(i-1,2);
752                 y1espp=yes(i-1,1);

```

```

749         y2espp=yes(i-1,2);
750
751         Px1BP=((((x1espp*y2espp)-(y1espp*x2espp
752             ))*(x3sol-x4sol))-((x1espp-x2espp)
753             *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
754         (((x1espp-x2espp)*(y3sol-y4sol))-((
755             y1espp-y2espp)*(x3sol-x4sol)));
756
757         if Px1BP<x2espp
758             bl_c=1;
759         else
760             bl_c=0;
761         end
762
763     elseif i~=1 && i~=n_esp
764
765         x1espn=xes(i+1,1);
766         x2espn=xes(i+1,2);
767         y1espn=yes(i+1,1);
768         y2espn=yes(i+1,2);
769
770         x1espp=xes(i-1,1);
771         x2espp=xes(i-1,2);
772         y1espp=yes(i-1,1);
773         y2espp=yes(i-1,2);
774
775         Px1BN=((((x1espn*y2espn)-(y1espn*x2espn
776             ))*(x3sol-x4sol))-((x1espn-x2espn)
777             *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
778         (((x1espn-x2espn)*(y3sol-y4sol))-((
779             y1espn-y2espn)*(x3sol-x4sol)));
780
781         Px1BP=((((x1espp*y2espp)-(y1espp*x2espp
782             ))*(x3sol-x4sol))-((x1espp-x2espp)
783             *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
784         (((x1espp-x2espp)*(y3sol-y4sol))-((
785             y1espp-y2espp)*(x3sol-x4sol)));
786
787     if a_pp>90
788         if Px1BP<x2espp
789             bl_c=1;
790         else
791             bl_c=0;
792         end
793     else
794         if Px1BN>x1espn
795             bl_c=1;
796         else
797             bl_c=0;

```

```

791         end
792     end
793
794     end
795
796     if bl_c~=1;
797
798     Px1(ct)=((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))*(x3sol-x4sol
799         ))-((x1esp-x2esp)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))
800         /...
801         (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-y2esp)*(
802             x3sol-x4sol))));
803
804     Py1(ct)=((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))*(y3sol-y4sol
805         ))-((y1esp-y2esp)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))
806         /...
807         (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-y2esp)*(
808             x3sol-x4sol))));
809
810     plot([x3sol,Px1(ct)], [y3sol,Py1(ct)], 'y')
811     ct=ct+1;
812     end
813 end
814
815 elseif x_ray_1>xpos
816
817     for x3sol=x_ray_1:prec:x_ray_u
818
819         x4sol=x3sol-(-tand(a_trans)*(y3sol-y4sol));
820         bl_c=0;
821
822         %Bloqueo por receptor
823
824         Px1R(((((-w_rec/2)*y_rec)-(y_rec*(w_rec/2)))*(x3sol
825             -x4sol))-(((w_rec/2)-(w_rec/2))*((x3sol*y4sol)-(
826             y3sol*x4sol)))/...
827             ((((-w_rec/2)-(w_rec/2))*(y3sol-y4sol))-((y_rec-
828             y_rec)*(x3sol-x4sol))));
829
830         if Px1R<(w_rec/2) && a_pp>90 && i>nepl
831             bl_rec=1;
832         elseif Px1R>(-w_rec/2) && a_pp<90 && i<(nepl+1)
833             bl_rec=1;
834         else
835             bl_rec=0;
836         end
837
838         if bl_rec==0
839
840             %Bloqueo por otros espejos

```



```

833         if i==1 && a_pp<90
834
835             x1espn=xes(i+1,1);
836             x2espn=xes(i+1,2);
837             y1espn=yes(i+1,1);
838             y2espn=yes(i+1,2);
839
840             Px1BN((((x1espn*y2espn)-(y1espn*x2espn)
841                 )*(x3sol-x4sol))-((x1espn-x2espn)
842                 *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
843             (((x1espn-x2espn)*(y3sol-y4sol))-((
844                 y1espn-y2espn)*(x3sol-x4sol)));
845
846             if Px1BN>x1espn
847                 bl_c=1;
848             else
849                 bl_c=0;
850             end
851
852         elseif i==n_esp && a_pp>90
853
854             x1espp=xes(i-1,1);
855             x2espp=xes(i-1,2);
856             y1espp=yes(i-1,1);
857             y2espp=yes(i-1,2);
858
859             Px1BP((((x1espp*y2espp)-(y1espp*x2espp)
860                 )*(x3sol-x4sol))-((x1espp-x2espp)
861                 *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
862             (((x1espp-x2espp)*(y3sol-y4sol))-((
863                 y1espp-y2espp)*(x3sol-x4sol)));
864
865             if Px1BP<x2espp
866                 bl_c=1;
867             else
868                 bl_c=0;
869             end
870
871         elseif i~=1 && i~=n_esp
872
873             x1espn=xes(i+1,1);
874             x2espn=xes(i+1,2);
875             y1espn=yes(i+1,1);
876             y2espn=yes(i+1,2);
877
878             x1espp=xes(i-1,1);
879             x2espp=xes(i-1,2);
880             y1espp=yes(i-1,1);
881             y2espp=yes(i-1,2);

```

```

878         Px1BN((((x1espn*y2espn)-(y1espn*x2espn
879             ))*(x3sol-x4sol))-((x1espn-x2espn)
880             *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
881         (((x1espn-x2espn)*(y3sol-y4sol))-((
882             y1espn-y2espn)*(x3sol-x4sol)));
883
884         Px1BP((((x1espp*y2espp)-(y1espp*x2espp
885             ))*(x3sol-x4sol))-((x1espp-x2espp)
886             *((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))/...
887         (((x1espp-x2espp)*(y3sol-y4sol))-((
888             y1espp-y2espp)*(x3sol-x4sol)));
889
890         if a_pp>90
891             if Px1BP<x2espp
892                 bl_c=1;
893             else
894                 bl_c=0;
895             end
896         else
897             if Px1BN>x1espn
898                 bl_c=1;
899             else
900                 bl_c=0;
901             end
902         end
903
904         if bl_c~=1;
905
906         Px1(ct)=((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))*(x3sol-x4sol
907             ))-((x1esp-x2esp)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))
908             /...
909             (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-y2esp)*(
910                 x3sol-x4sol)));
911
912         Py1(ct)=((((x1esp*y2esp)-(y1esp*x2esp))*(y3sol-y4sol
913             ))-((y1esp-y2esp)*((x3sol*y4sol)-(y3sol*x4sol))))
914             /...
915             (((x1esp-x2esp)*(y3sol-y4sol))-((y1esp-y2esp)*(
916                 x3sol-x4sol)));
917
918         plot([x3sol,Px1(ct)],[y3sol,Py1(ct)],'y')
919
920         ct=ct+1;
921
922     end
923 end
924
925 end

```

```

917
918     end
919
920
921     %Segunda Interseccion
922
923     %Reflexion Real
924
925     if a_pp>n_aim(i)
926         gamm=a_pp-n_aim(i);
927         ref_real(i)=n_aim(i)-gamm;
928     elseif a_pp<n_aim(i)
929         gamm=n_aim(i)-a_pp;
930         ref_real(i)=n_aim(i)+gamm;
931     else
932         ref_real(i)=n_aim(i);
933     end
934
935
936     for j=1:ct-1 % cada uno de los rayos reflejados
937
938         %crear lineas reflexion
939         if a_ref(i)<90
940             x_ref_esp(j)=Px1(j)+0.5;
941             y_ref_esp(j)=(.5*tand(ref_real(i)))+Py1(j);
942         else
943             x_ref_esp(j)=Px1(j)-0.5;
944             y_ref_esp(j)=(.5*tand(180-ref_real(i)))+Py1(j);
945         end
946
947         %comprobar bloqueo
948
949         if a_ref(i)<90 && i<n_esp %Bloqueo Siguiente
950
951             x1esp_n=xes(i+1,1);
952             x2esp_n=xes(i+1,2);
953             y1esp_n=yes(i+1,1);
954             y2esp_n=yes(i+1,2);
955
956             PxB(j)=((((x1esp_n*y2esp_n)-(y1esp_n*x2esp_n))*(
957                 x_ref_esp(j)-Px1(j)))-((x1esp_n-x2esp_n)*((
958                 x_ref_esp(j)*Py1(j))-(y_ref_esp(j)*Px1(j))))) / ...
959                 (((x1esp_n-x2esp_n)*(y_ref_esp(j)-Py1(j)))-((
960                 y1esp_n-y2esp_n)*(x_ref_esp(j)-Px1(j))));
961
962             PyB(j)=((((x1esp_n*y2esp_n)-(y1esp_n*x2esp_n))*(
963                 y_ref_esp(j)-Py1(j)))-((y1esp_n-y2esp_n)*((
964                 x_ref_esp(j)*Py1(j))-(y_ref_esp(j)*Px1(j))))) / ...
965                 (((x1esp_n-x2esp_n)*(y_ref_esp(j)-Py1(j)))-((
966                 y1esp_n-y2esp_n)*(x_ref_esp(j)-Px1(j))));

```

```

962
963
964         if PxB(j)>x1esp_n
965             plot([Px1(j),PxB(j)],[Py1(j),PyB(j)], 'm')
966             Px1(j)=-210;
967             Py1(j)=-210;
968         end
969
970     elseif a_ref(i)>90 && i>1 %Bloqueo Anterior
971
972         x1esp_p=xes(i-1,1);
973         x2esp_p=xes(i-1,2);
974         y1esp_p=yes(i-1,1);
975         y2esp_p=yes(i-1,2);
976
977         PxB(j)=((((x1esp_p*y2esp_p)-(y1esp_p*x2esp_p))*
978             (x_ref_esp(j)-Px1(j)))-((x1esp_p-x2esp_p)*((
979             x_ref_esp(j)*Py1(j))-(y_ref_esp(j)*Px1(j)))))/...
980             (((x1esp_p-x2esp_p)*(y_ref_esp(j)-Py1(j)))-((
981             y1esp_p-y2esp_p)*(x_ref_esp(j)-Px1(j))));
982
983         PyB(j)=((((x1esp_p*y2esp_p)-(y1esp_p*x2esp_p))*
984             (y_ref_esp(j)-Py1(j)))-((y1esp_p-y2esp_p)*((
985             x_ref_esp(j)*Py1(j))-(y_ref_esp(j)*Px1(j)))))/...
986             (((x1esp_p-x2esp_p)*(y_ref_esp(j)-Py1(j)))-((
987             y1esp_p-y2esp_p)*(x_ref_esp(j)-Px1(j))));
988
989         if PxB(j)<x2esp_p
990             plot([Px1(j),PxB(j)],[Py1(j),PyB(j)], 'm')
991             Px1(j)=-210;
992             Py1(j)=-210;
993         end
994     end
995
996     %% INTERSECCION CON HIPERBOLA
997
998     if Px1(j)~-210 %Determina que no hay bloqueo
999
1000         for n=1:k-1
1001
1002             PxH(j)=((((xhip(n)*yhip(n+1))-(yhip(n)*xhip(n+1)))*
1003                 (x_ref_esp(j)-Px1(j)))-((xhip(n)-xhip(n+1))*((
1004                 x_ref_esp(j)*Py1(j))-(y_ref_esp(j)*Px1(j)))))/...
1005                 (((xhip(n)-xhip(n+1))*(y_ref_esp(j)-Py1(j)))-((
1006                 yhip(n)-yhip(n+1))*(x_ref_esp(j)-Px1(j))));
1007
1008             PyH(j)=((((xhip(n)*yhip(n+1))-(yhip(n)*xhip(n+1)))*
1009                 (y_ref_esp(j)-Py1(j)))-((yhip(n)-yhip(n+1))*((

```

```

1003         x_ref_esp(j)*Py1(j))-(y_ref_esp(j)*Px1(j)))))/...
        (((xhip(n)-xhip(n+1))*(y_ref_esp(j)-Py1(j)))-((
            yhip(n)-yhip(n+1))*(x_ref_esp(j)-Px1(j))));
1004
1005
1006         if PxH(j)<xhip(1) || PxH(j)>xhip(k)
1007             PxH(j)=-210;
1008
1009         else
1010             if PxH(j)>=xhip(n) && PxH(j)<=xhip(n+1)
1011                 break
1012             end
1013         end
1014
1015     end
1016     if PxH(j)~-210;
1017         plot([Px1(j),PxH(j)],[Py1(j),PyH(j)],'m')
1018     h_r_min(j,i)=Py1(j);
1019     h_r_max(j,i)=PyH(j);
1020
1021     % Aqui ya conozco la interseccion con la hiperbola y
        conozco n,
1022     % que puedo relacionar con k para obtener el hip_aim
1023
1024
1025     % Reflexion Hiperbola
1026
1027     if ref_real(i)<90;
1028         if hip_aim(n)<(-180+ref_real(i));
1029
1030             gamm_hip(j)=(-180+ref_real(i))-hip_aim(n);
1031             ref_hip(j)=hip_aim(n)-gamm_hip(j);
1032
1033         else
1034
1035             gamm_hip(j)=hip_aim(n)-(-180+ref_real(i));
1036             ref_hip(j)=hip_aim(n)+gamm_hip(j);
1037         end
1038
1039     else ref_real(i)>90;
1040         if hip_aim(n)<(-180+ref_real(i));
1041
1042             gamm_hip(j)=(-180+ref_real(i))-hip_aim(n);
1043             ref_hip(j)=hip_aim(n)-gamm_hip(j);
1044
1045         else
1046
1047             gamm_hip(j)=hip_aim(n)-(-180+ref_real(i));
1048             ref_hip(j)=hip_aim(n)+gamm_hip(j);
1049         end
1050

```

```

1051         end
1052
1053         %crear lineas reflexion
1054
1055
1056
1057         if ref_hip(j)>-90
1058             y_ref_hip(j)=PyH(j)-1;
1059             ang_c=90+ref_hip(j);
1060             x_ref_hip(j)=PxH(j)+(tand(ang_c));
1061         else
1062             y_ref_hip(j)=PyH(j)-1;
1063             ang_c=-90-ref_hip(j);
1064             x_ref_hip(j)=PxH(j)-(tand(ang_c));
1065         end
1066
1067
1068         PxR(j)=(((((-w_rec/2*y_rec)-(y_rec*w_rec/2))*
1069             x_ref_hip(j)-PxH(j)))-((-w_rec/2-w_rec/2)*((
1070             x_ref_hip(j)*PyH(j))-(y_ref_hip(j)*PxH(j)))))/...
1071             (((-w_rec/2-w_rec/2)*(y_ref_hip(j)-PyH(j)))-((
1072             y_rec-y_rec)*(x_ref_hip(j)-PxH(j))));
1073
1074         PyR(j)=(((((-w_rec/2*y_rec)-(y_rec*w_rec/2))*
1075             y_ref_hip(j)-PyH(j)))-((y_rec-y_rec)*((x_ref_hip(
1076             j)*PyH(j))-(y_ref_hip(j)*PxH(j)))))/...
1077             (((-w_rec/2-w_rec/2)*(y_ref_hip(j)-PyH(j)))-((
1078             y_rec-y_rec)*(x_ref_hip(j)-PxH(j))));
1079
1080
1081         if PxR(j)<Px_rec_min(i)
1082             Px_rec_min(i)=PxR(j);
1083         elseif PxR(j)>Px_rec_max(i)
1084             Px_rec_max(i)=PxR(j);
1085         end
1086
1087
1088
1089
1090         if PxR(j)>-w_rec/2 && PxR(j)<w_rec/2
1091             plot([PxH(j),PxR(j)],[PyH(j),PyR(j)],'g')
1092             hit(i)=hit(i)+1;
1093         else
1094             plot([PxH(j),PxR(j)],[PyH(j),PyR(j)],'r')
1095             miss(i)=miss(i)+1;
1096         end
1097     end
1098
1099     %% Apertura solar izq (-SS_D)
1100
1101     if Px1(j)~-210;

```

```

1096         xOPEi_sol(j)=Px1(j)-(tand(a_trans-SS_D)*(y3sol-y_rec))
1097         ;
1098
1099         if xOPEi_sol(j)>xpos || xOPEi_sol(j)<xneg
1100
1101             ct=ct+1;
1102             plot([xOPEi_sol(j),Px1(j)], [y3sol,Py1(j)], 'y')
1103
1104         end
1105
1106
1107
1108
1109         %Reflexion Real
1110
1111         if a_pp-SS_D>n_aim(i)
1112             gamm=a_pp-SS_D-n_aim(i);
1113             ref_real_i(i)=n_aim(i)-gamm;
1114         elseif a_pp-SS_D<n_aim(i)
1115             gamm=n_aim(i)-a_pp-SS_D;
1116             ref_real_i(i)=n_aim(i)+gamm;
1117         else
1118             ref_real_i(i)=n_aim(i);
1119         end
1120
1121
1122
1123
1124
1125         %crear lineas reflexion
1126         if a_ref(i)<90
1127             x_ref_esp_i(j)=Px1(j)+0.5;
1128             y_ref_esp_i(j)=(.5*tand(ref_real_i(i)))+Py1(j);
1129         else
1130             x_ref_esp_i(j)=Px1(j)-0.5;
1131             y_ref_esp_i(j)=(.5*tand(180-ref_real_i(i)))+Py1(j);
1132         end
1133
1134         %comprobar bloqueo
1135
1136         if a_ref(i)<90 && i<n_esp %Bloqueo Siguiente
1137
1138             x1esp_n=xes(i+1,1);
1139             x2esp_n=xes(i+1,2);
1140             y1esp_n=yes(i+1,1);
1141             y2esp_n=yes(i+1,2);
1142
1143             PxB_i(j)=((((x1esp_n*y2esp_n)-(y1esp_n*x2esp_n))*
1144                 (x_ref_esp_i(j)-Px1(j)))-((x1esp_n-x2esp_n)*((
1145                 x_ref_esp_i(j)*Py1(j))-(y_ref_esp_i(j)*Px1(j))))

```

```

1144         )/...
1145         (((x1esp_n-x2esp_n)*(y_ref_esp_i(j)-Py1(j)))-((
1146             y1esp_n-y2esp_n)*(x_ref_esp_i(j)-Px1(j))));
1147
1148         PyB_i(j)=((((x1esp_n*y2esp_n)-(y1esp_n*x2esp_n))*(
1149             y_ref_esp_i(j)-Py1(j)))-((y1esp_n-y2esp_n)*((
1150             x_ref_esp_i(j)*Py1(j))-(y_ref_esp_i(j)*Px1(j)))))
1151         )/...
1152         (((x1esp_n-x2esp_n)*(y_ref_esp_i(j)-Py1(j)))-((
1153             y1esp_n-y2esp_n)*(x_ref_esp_i(j)-Px1(j))));
1154
1155         if PxB_i(j)>x1esp_n
1156             plot([Px1(j),PxB_i(j)],[Py1(j),PyB_i(j)],'m
1157                 ')
1158             Px1(j)=-210;
1159             Py1(j)=-210;
1160         end
1161
1162     elseif a_ref(i)>90 && i>1 %Bloqueo Anterior
1163
1164         x1esp_p=xes(i-1,1);
1165         x2esp_p=xes(i-1,2);
1166         y1esp_p=yes(i-1,1);
1167         y2esp_p=yes(i-1,2);
1168
1169         PxB_i(j)=((((x1esp_p*y2esp_p)-(y1esp_p*x2esp_p))*(
1170             x_ref_esp_i(j)-Px1(j)))-((x1esp_p-x2esp_p)*((
1171             x_ref_esp_i(j)*Py1(j))-(y_ref_esp_i(j)*Px1(j)))))
1172         )/...
1173         (((x1esp_p-x2esp_p)*(y_ref_esp_i(j)-Py1(j)))-((
1174             y1esp_p-y2esp_p)*(x_ref_esp_i(j)-Px1(j))));
1175
1176         PyB_i(j)=((((x1esp_p*y2esp_p)-(y1esp_p*x2esp_p))*(
1177             y_ref_esp_i(j)-Py1(j)))-((y1esp_p-y2esp_p)*((
1178             x_ref_esp_i(j)*Py1(j))-(y_ref_esp_i(j)*Px1(j)))))
1179         )/...
1180         (((x1esp_p-x2esp_p)*(y_ref_esp_i(j)-Py1(j)))-((
1181             y1esp_p-y2esp_p)*(x_ref_esp_i(j)-Px1(j))));
1182
1183         if PxB_i(j)<x2esp_p
1184             plot([Px1(j),PxB_i(j)],[Py1(j),PyB_i(j)],'m
1185                 ')
1186             Px1(j)=-210;
1187             Py1(j)=-210;
1188         end
1189     end
1190
1191 % Ref Hip

```



```

1179
1180         if Px1(j) ~= -210 %Determina que no hay bloqueo
1181
1182             for n=1:k-1
1183
1184
1185                 PxH_i(j) = (((xhip(n)*yhip(n+1)) - (yhip(n)*xhip(n+1))
1186                     )*(x_ref_esp_i(j) - Px1(j))) - ((xhip(n) - xhip(n+1))
1187                     *((x_ref_esp_i(j)*Py1(j)) - (y_ref_esp_i(j)*Px1(j)
1188                     )))) / ...
1189                     (((xhip(n) - xhip(n+1)) * (y_ref_esp_i(j) - Py1(j)))
1190                     - ((yhip(n) - yhip(n+1)) * (x_ref_esp_i(j) - Px1(j)
1191                     )));
1192
1193                 PyH_i(j) = (((xhip(n)*yhip(n+1)) - (yhip(n)*xhip(n+1))
1194                     )*(y_ref_esp_i(j) - Py1(j))) - ((yhip(n) - yhip(n+1))
1195                     *((x_ref_esp_i(j)*Py1(j)) - (y_ref_esp_i(j)*Px1(j)
1196                     )))) / ...
1197                     (((xhip(n) - xhip(n+1)) * (y_ref_esp_i(j) - Py1(j)))
1198                     - ((yhip(n) - yhip(n+1)) * (x_ref_esp_i(j) - Px1(j)
1199                     )));
1200
1201                 if PxH_i(j) < xhip(1) || PxH_i(j) > xhip(k)
1202                     PxH_i(j) = -210;
1203
1204                 else
1205                     if PxH_i(j) >= xhip(n) && PxH_i(j) <= xhip(n+1)
1206                         break
1207                     end
1208                 end
1209
1210             end
1211
1212         if PxH_i(j) ~= -210;
1213             plot([Px1(j), PxH_i(j)], [Py1(j), PyH_i(j)], 'm')
1214
1215         % Aqui ya conozco la interseccion con la hiperbola
1216         y conozco n,
1217
1218         % que puedo relacionar con k para obtener el
1219         hip_aim
1220
1221
1222         % Reflexion Hiperbola
1223
1224         if ref_real_i(i) < 90;
1225             if hip_aim(n) < (-180 + ref_real_i(i));
1226
1227                 gamm_hip_i(j) = (-180 + ref_real_i(i)) - hip_aim(
1228                     n);
1229                 ref_hip_i(j) = hip_aim(n) - gamm_hip_i(j);
1230
1231
1232
1233
1234
1235
1236

```

```

1217         else
1218
1219             gamm_hip_i(j)=hip_aim(n)-(-180+ref_real_i(i)
1220                 ));
1221             ref_hip_i(j)=hip_aim(n)+gamm_hip_i(j);
1222         end
1223     else ref_real_i(i)>90;
1224         if hip_aim(n)<(-180+ref_real_i(i));
1225
1226             gamm_hip_i(j)=(-180+ref_real_i(i))-hip_aim(
1227                 n);
1228             ref_hip_i(j)=hip_aim(n)-gamm_hip_i(j);
1229         else
1230
1231             gamm_hip_i(j)=hip_aim(n)-(-180+ref_real_i(i)
1232                 ));
1233             ref_hip_i(j)=hip_aim(n)+gamm_hip_i(j);
1234         end
1235     end
1236
1237     %crear lineas reflexion
1238
1239
1240
1241     if ref_hip_i(j)>-90
1242         y_ref_hip_i(j)=PyH_i(j)-1;
1243         ang_c=90+ref_hip_i(j);
1244         x_ref_hip_i(j)=PxH_i(j)+(tand(ang_c));
1245     else
1246         y_ref_hip_i(j)=PyH_i(j)-1;
1247         ang_c=-90-ref_hip_i(j);
1248         x_ref_hip_i(j)=PxH_i(j)-(tand(ang_c));
1249     end
1250
1251
1252     PxR_i(j)=(((((-w_rec/2*y_rec)-(y_rec*w_rec/2))*
1253         x_ref_hip_i(j)-PxH_i(j)))-((-w_rec/2-w_rec/2)*((
1254         x_ref_hip_i(j)*PyH_i(j))-(y_ref_hip_i(j)*PxH_i(j)
1255         )))))/...
1256         (((-w_rec/2-w_rec/2)*(y_ref_hip_i(j)-PyH_i(j)))
1257             -((y_rec-y_rec)*(x_ref_hip_i(j)-PxH_i(j))));
1258
1259     PyR_i(j)=(((((-w_rec/2*y_rec)-(y_rec*w_rec/2))*
1260         y_ref_hip_i(j)-PyH_i(j)))-((y_rec-y_rec)*((
1261         x_ref_hip_i(j)*PyH_i(j))-(y_ref_hip_i(j)*PxH_i(j)
1262         )))))/...
1263         (((-w_rec/2-w_rec/2)*(y_ref_hip_i(j)-PyH_i(j)))
1264             -((y_rec-y_rec)*(x_ref_hip_i(j)-PxH_i(j))));

```

```

1257
1258     if PxR_i(j)<Px_rec_min(i)
1259         Px_rec_min(i)=PxR_i(j);
1260     elseif PxR_i(j)>Px_rec_max(i)
1261         Px_rec_max(i)=PxR_i(j);
1262     end
1263
1264
1265
1266         if PxR_i(j)>-w_rec/2 && PxR_i(j)<w_rec/2
1267             plot([PxH_i(j),PxR_i(j)],[PyH_i(j),PyR_i(j)],'g')
1268             hit(i)=hit(i)+1;
1269         else
1270             plot([PxH_i(j),PxR_i(j)],[PyH_i(j),PyR_i(j)],'r')
1271             miss(i)=miss(i)+1;
1272         end
1273     end
1274 end
1275
1276
1277     %% Apertura solar dere (+SS_D)
1278
1279
1280 if Px1(j)~-210;
1281
1282     xOPEd_sol(j)=Px1(j)-(tand(a_trans+SS_D)*(y3sol-y_rec))
1283     ;
1284
1285     if xOPEd_sol(j)>xpos || xOPEd_sol(j)<xneg
1286
1287         ct=ct+1;
1288         plot([xOPEd_sol(j),Px1(j)],[y3sol,Py1(j)],'y')
1289     end
1290
1291
1292
1293
1294     %Reflexion Real
1295
1296     if a_pp+SS_D>n_aim(i)
1297         gamm=a_pp+SS_D-n_aim(i);
1298         ref_real_d(i)=n_aim(i)-gamm;
1299     elseif a_pp+SS_D<n_aim(i)
1300         gamm=n_aim(i)-a_pp+SS_D;
1301         ref_real_d(i)=n_aim(i)+gamm;
1302     else
1303         ref_real_d(i)=n_aim(i);
1304     end
1305
1306

```

```

1307
1308
1309
1310 %crear lineas reflexion
1311 if a_ref(i)<90
1312     x_ref_esp_d(j)=Px1(j)+0.5;
1313     y_ref_esp_d(j)=(.5*tand(ref_real_d(i)))+Py1(j);
1314 else
1315     x_ref_esp_d(j)=Px1(j)-0.5;
1316     y_ref_esp_d(j)=(.5*tand(180-ref_real_d(i)))+Py1(j);
1317 end
1318
1319 %comprobar bloqueo
1320
1321 if a_ref(i)<90 && i<n_esp %Bloqueo Siguiente
1322
1323     x1esp_n=xes(i+1,1);
1324     x2esp_n=xes(i+1,2);
1325     y1esp_n=yes(i+1,1);
1326     y2esp_n=yes(i+1,2);
1327
1328     PxB_d(j)=((((x1esp_n*y2esp_n)-(y1esp_n*x2esp_n))*
1329         (x_ref_esp_d(j)-Px1(j)))-((x1esp_n-x2esp_n)*((
1330         x_ref_esp_d(j)*Py1(j))-(y_ref_esp_d(j)*Px1(j))))
1331         /...
1332         (((x1esp_n-x2esp_n)*(y_ref_esp_d(j)-Py1(j)))-((
1333         y1esp_n-y2esp_n)*(x_ref_esp_d(j)-Px1(j))));
1334
1335     PyB_d(j)=((((x1esp_n*y2esp_n)-(y1esp_n*x2esp_n))*
1336         (y_ref_esp_d(j)-Py1(j)))-((y1esp_n-y2esp_n)*((
1337         x_ref_esp_d(j)*Py1(j))-(y_ref_esp_d(j)*Px1(j))))
1338         /...
1339         (((x1esp_n-x2esp_n)*(y_ref_esp_d(j)-Py1(j)))-((
1340         y1esp_n-y2esp_n)*(x_ref_esp_d(j)-Px1(j))));
1341
1342     if PxB_d(j)>x1esp_n
1343         plot([Px1(j),PxB_d(j)], [Py1(j),PyB_d(j)], 'm
1344             ')
1345         Px1(j)=-210;
1346         Py1(j)=-210;
1347     end
1348
1349 elseif a_ref(i)>90 && i>1 %Bloqueo Anterior
1350
1351     x1esp_p=xes(i-1,1);
1352     x2esp_p=xes(i-1,2);
1353     y1esp_p=yes(i-1,1);
1354     y2esp_p=yes(i-1,2);
1355

```

```

1349     PxB_d(j)=((((x1esp_p*y2esp_p)-(y1esp_p*x2esp_p))*(
        x_ref_esp_d(j)-Px1(j)))-((x1esp_p-x2esp_p)*((
        x_ref_esp_d(j)*Py1(j))-(y_ref_esp_d(j)*Px1(j))))
        )/...
1350     (((x1esp_p-x2esp_p)*(y_ref_esp_d(j)-Py1(j)))-((
        y1esp_p-y2esp_p)*(x_ref_esp_d(j)-Px1(j))));
1351
1352     PyB_d(j)=((((x1esp_p*y2esp_p)-(y1esp_p*x2esp_p))*(
        y_ref_esp_d(j)-Py1(j)))-((y1esp_p-y2esp_p)*((
        x_ref_esp_d(j)*Py1(j))-(y_ref_esp_d(j)*Px1(j))))
        )/...
1353     (((x1esp_p-x2esp_p)*(y_ref_esp_d(j)-Py1(j)))-((
        y1esp_p-y2esp_p)*(x_ref_esp_d(j)-Px1(j))));
1354
1355     if PxB_d(j)<x2esp_p
1356         plot([Px1(j),PxB_d(j)],[Py1(j),PyB_d(j)],'m
            ','')
1357         Px1(j)=-210;
1358         Py1(j)=-210;
1359     end
1360 end
1361
1362 % Ref Hip
1363
1364 if Px1(j)~= -210 %Determina que no hay bloqueo
1365
1366     for n=1:k-1
1367
1368
1369
1370     PxH_d(j)=((((xhip(n)*yhip(n+1))-(yhip(n)*xhip(n+1))
        )*(x_ref_esp_d(j)-Px1(j)))-((xhip(n)-xhip(n+1))
        *((x_ref_esp_d(j)*Py1(j))-(y_ref_esp_d(j)*Px1(j)
        ))))/...
1371     (((xhip(n)-xhip(n+1))*(y_ref_esp_d(j)-Py1(j)))-
        ((yhip(n)-yhip(n+1))*(x_ref_esp_d(j)-Px1(j)
        ))));
1372
1373     PyH_d(j)=((((xhip(n)*yhip(n+1))-(yhip(n)*xhip(n+1))
        )*(y_ref_esp_d(j)-Py1(j)))-((yhip(n)-yhip(n+1))
        *((x_ref_esp_d(j)*Py1(j))-(y_ref_esp_d(j)*Px1(j)
        ))))/...
1374     (((xhip(n)-xhip(n+1))*(y_ref_esp_d(j)-Py1(j)))-
        ((yhip(n)-yhip(n+1))*(x_ref_esp_d(j)-Px1(j)
        ))));
1375
1376
1377     if PxH_d(j)<xhip(1) || PxH_d(j)>xhip(k)
1378         PxH_d(j)=-210;
1379
1380     else

```

```

1381         if PxH_d(j)>=xhip(n) && PxH_d(j)<=xhip(n+1)
1382             break
1383         end
1384     end
1385
1386 end
1387 if PxH_d(j) ~= -210;
1388     plot([Px1(j),PxH_d(j)],[Py1(j),PyH_d(j)], 'm')
1389
1390 % Aqui ya conozco la interseccion con la hiperbola
1391 % y conozco n,
1392 % que puedo relacionar con k para obtener el
1393     hip_aim
1394
1395 % Reflexion Hiperbola
1396
1397 if ref_real_d(i)<90;
1398     if hip_aim(n)<(-180+ref_real_d(i));
1399
1400         gamm_hip_d(j)=(-180+ref_real_d(i))-hip_aim(
1401             n);
1402         ref_hip_d(j)=hip_aim(n)-gamm_hip_d(j);
1403
1404     else
1405
1406         gamm_hip_d(j)=hip_aim(n)-(-180+ref_real_d(i)
1407             ));
1408         ref_hip_d(j)=hip_aim(n)+gamm_hip_d(j);
1409     end
1410
1411 else ref_real_d(i)>90;
1412     if hip_aim(n)<(-180+ref_real_d(i));
1413
1414         gamm_hip_d(j)=(-180+ref_real_d(i))-hip_aim(
1415             n);
1416         ref_hip_d(j)=hip_aim(n)-gamm_hip_d(j);
1417
1418     else
1419
1420         gamm_hip_d(j)=hip_aim(n)-(-180+ref_real_d(i)
1421             ));
1422         ref_hip_d(j)=hip_aim(n)+gamm_hip_d(j);
1423     end
1424
1425 end
1426
1427 %crear lineas reflexion

```

```

1426         if ref_hip_d(j)>-90
1427             y_ref_hip_d(j)=PyH_d(j)-1;
1428             ang_c=90+ref_hip_d(j);
1429             x_ref_hip_d(j)=PxH_d(j)+(tand(ang_c));
1430         else
1431             y_ref_hip_d(j)=PyH_d(j)-1;
1432             ang_c=-90-ref_hip_d(j);
1433             x_ref_hip_d(j)=PxH_d(j)-(tand(ang_c));
1434         end
1435
1436
1437         PxR_d(j)=(((((-w_rec/2*y_rec)-(y_rec*w_rec/2))*(
1438             x_ref_hip_d(j)-PxH_d(j)))-((-w_rec/2-w_rec/2)*((
1439             x_ref_hip_d(j)*PyH_d(j))-(y_ref_hip_d(j)*PxH_d(j)
1440             )))))/...
1441         (((-w_rec/2-w_rec/2)*(y_ref_hip_d(j)-PyH_d(j)))
1442             -((y_rec-y_rec)*(x_ref_hip_d(j)-PxH_d(j))));
1443
1444         PyR_d(j)=(((((-w_rec/2*y_rec)-(y_rec*w_rec/2))*(
1445             y_ref_hip_d(j)-PyH_d(j)))-((y_rec-y_rec)*((
1446             x_ref_hip_d(j)*PyH_d(j))-(y_ref_hip_d(j)*PxH_d(j)
1447             )))))/...
1448         (((-w_rec/2-w_rec/2)*(y_ref_hip_d(j)-PyH_d(j)))
1449             -((y_rec-y_rec)*(x_ref_hip_d(j)-PxH_d(j))));
1450
1451         if PxR_d(j)<Px_rec_min(i)
1452             Px_rec_min(i)=PxR_d(j);
1453         elseif PxR_d(j)>Px_rec_max(i)
1454             Px_rec_max(i)=PxR_d(j);
1455         end
1456
1457         if PxR_d(j)>-w_rec/2 && PxR_d(j)<w_rec/2
1458             plot([PxH_d(j),PxR_d(j)],[PyH_d(j),PyR_d(j)],'g')
1459             hit(i)=hit(i)+1;
1460         else
1461             plot([PxH_d(j),PxR_d(j)],[PyH_d(j),PyR_d(j)],'r')
1462             miss(i)=miss(i)+1;
1463         end
1464     end
1465 end
1466
1467     ct=1;
1468
1469 end

```

```

1469
1470
1471
1472 for i=1:n_esp
1473     r_tot(i)=0;
1474     x_ray_1=xes(i,1)+(-tand(a_trans)*(htapa-yes(i,1)));
1475     x_ray_u=xes(i,2)+(-tand(a_trans)*(htapa-yes(i,2)));
1476     for gg=x_ray_1:prec:x_ray_u
1477         r_tot(i)=r_tot(i)+1;
1478     end
1479 end
1480
1481 r_tot=3*r_tot;
1482
1483     h_r_min(j,i)=Py1(j);
1484     h_r_max(j,i)=PyH(j);
1485     h_ray_1= h_r_max-h_r_min;
1486     h_ray_2= h_r_max;
1487
1488
1489 [j_max,i_max]=size(h_r_max);
1490
1491
1492
1493 for i=1:n_esp
1494
1495     r_final(i)=hit(i)+miss(i);
1496
1497 end
1498
1499
1500 %% Rendimientos
1501
1502
1503 % Reflectividad
1504
1505 Ref=0.96;
1506
1507 % Factor de Fin
1508
1509 if a_elev==0
1510     R_fin=ones(n_esp,1);
1511 else
1512     long_desv=(h_ray_1/tand(a_elev))+(h_ray_2/tand(a_elev));
1513
1514     for i=1:n_esp
1515         bl_ct(i)=0;
1516         for j=1:j_max
1517             if long_desv(j,i)>l_e
1518                 R_fini(j,i)=0;
1519             elseif long_desv(j,i)==0;

```



```

1520         R_fini(j,i)=0;
1521         bl_ct(i)=bl_ct(i)+1;
1522     else
1523         R_fini(j,i)=(l_e-long_desv(j,i))/l_e;
1524     end
1525 end
1526 end
1527 end
1528
1529 R_f_aux=sum(R_fini);
1530
1531 for i=1:n_esp
1532     if R_f_aux(i)==0;
1533         R_fin(i)=0;
1534     else
1535         R_fin(i)=R_f_aux(i)/(j_max-bl_ct(i));
1536     end
1537 end
1538
1539 R_finmed=sum(R_fin)/n_esp
1540 % Perdida del Coseno
1541
1542 cosalf_1;
1543
1544
1545 cosalfmed=sum(cosalf_1)/n_esp
1546
1547 % Factor de Desborde
1548
1549 for i=1:n_esp
1550     if Px_rec_max(i)<(w_rec/2) && Px_rec_min(i)>(-w_rec/2) &&
        Px_rec_max(i)>(-w_rec/2) && Px_rec_min(i)<(w_rec/2)
1551         R_desb(i)=1;
1552
1553     elseif Px_rec_max(i)<(w_rec/2) && Px_rec_min(i)<(-w_rec/2)
        && Px_rec_max(i)>(-w_rec/2)
1554         a_util(i)=(w_rec/2)+Px_rec_max(i);
1555         R_desb(i)=a_util(i)/(Px_rec_max(i)-Px_rec_min(i));
1556
1557     elseif Px_rec_max(i)>(w_rec/2) && Px_rec_min(i)>(-w_rec/2)
        && Px_rec_min(i)<(w_rec/2)
1558         a_util(i)=(w_rec/2)-Px_rec_min(i);
1559         R_desb(i)=a_util(i)/(Px_rec_max(i)-Px_rec_min(i));
1560
1561     elseif Px_rec_max(i)>(w_rec/2) && Px_rec_min(i)<(-w_rec/2)
1562         R_desb(i)=w_rec/(Px_rec_max(i)-Px_rec_min(i));
1563
1564     elseif Px_rec_max(i)==-10 && Px_rec_min(i)==10
1565         R_desb(i)=0;
1566     else
1567         R_desb(i)=0;

```

```

1568         end
1569     end
1570
1571
1572     R_desbmed=sum(R_desb)/n_esp
1573     % Sombras y Bloqueos
1574
1575     for i=1:n_esp
1576
1577         R_syb(i)=r_final(i)/r_tot(i);
1578
1579     end
1580
1581     R_sybmed=sum(R_syb)/n_esp
1582
1583
1584     raype=sum(r_tot)/(n_esp*3);
1585     % Rendimiento Global y Flujo de Calor
1586
1587     for i=1:n_esp
1588         RO(i)=Ref*Ref*R_desb(i)*R_syb(i)*cosalf_1(i); %R_fin(i)*
1589         Q_esp(i)=(DNI*w_e*RO(i))/w_rec;
1590     end
1591
1592     RO_tot=0;
1593     Q_esp_tot=0;
1594
1595     for i=1:n_esp
1596         Q_esp_tot=Q_esp_tot+Q_esp(i);
1597         RO_tot=RO_tot+RO(i);
1598     end
1599
1600     RO_med=RO_tot/n_esp
1601     Q_esp_tot
1602     disp('Watts por metro cuadrado')
1603
1604     if ctr==1
1605         Q_dir=0;
1606     else
1607         Q_dir=DNI;
1608     end
1609
1610
1611
1612     Q_dir
1613     disp('Watts por metro cuadrado')
1614
1615
1616     Q_tot=Q_esp_tot+Q_dir
1617     disp('Watts por metro cuadrado')

```

ANEXO B. CÓDIGO PARA ACOPLAR CON SOLTRACE

```
1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%HIPERBOLA VERTICAL %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  clc
3  clear all
4
5  % Parametros de Referencia (No modificar)
6  a_ref=0;
7  q=0;
8  k=0;
9  j=0;
10 y_aimo=-1;
11
12 % Focos
13 F1=0;
14 F2=8;
15
16 % Parametros Hiperbola ideal
17
18 exc=0.6563; %excentricidad de la hiperbola
19
20 c=(F2-F1)/2;
21 a=(exc-0.5)*2*c;
22 b=sqrt((c^2)-(a^2));
23
24
25
26 x_width=6.8; % ancho de la hiperbola
27 divisiones=5; % NUMERO DE ESPEJOS EN CADA LADO DE LA HIPERBOLA [
    INTRODUCIR LA MITAD DEL TOTAL DESEADO]
28
29 xneg=-x_width/2;
30 xpos=x_width/2;
31 paso=x_width/(divisiones*2);
32
33 w_tot=0;
34
35 for xi=xneg:paso:xpos
36     k=k+1;
37     x(k)=xi;
38     y(k)=c+sqrt((a^2)+(a*xi/b)^2);
39 end
40
41 y(1)
42 hold on
43 plot(x,y,'r--o','LineWidth', 2)
44 grid on
```

```

45 xlabel('Posicion horizontal [m]')
46 ylabel('Altura [m]')
47 set(gca,'FontName','Arial','FontSize',32)
48
49
50 for j=1:k-1
51
52     m(j)=(y(j+1)-y(j))/(x(j+1)-x(j));
53     fi(j)=atand(m(j));
54     n(j)=fi(j)-90;
55     cx(j)=(x(j+1)+x(j))/2;
56     cy(j)=(y(j+1)+y(j))/2;
57     w(j)=sqrt(((y(j+1)-y(j))^2)+((x(j+1)-x(j))^2));
58     y_aim(j)=cy(j)+y_aimo;
59     a_ref=a_ref+(w(j)*50);
60     if n(j)<-90
61         alf=n(j)+90;
62         x_aim(j)=cx(j)-(tand(alf)*y_aimo);
63     else
64         alf=n(j);
65         x_aim(j)=cx(j)+(y_aimo/tand(alf));
66
67     end
68     w_tot=w_tot+w(j);
69 end
70
71
72 xprim=x';
73 yprim=y';
74 xn = (xneg:0.01:xpos)';
75 yn = interp1q(xprim,yprim,xn);
76
77
78
79 cx=cx.';
80 cy=cy.';
81 x_aim=x_aim.';
82 y_aim=y_aim.';
83 w=w.';
84 table(cx,cy,x_aim,y_aim,w)
85
86 w_tot
87
88 w_tot_id=0;
89
90 for xi=xneg:0.01:xpos
91     q=q+1;
92     x_id(q)=xi;
93     y_id(q)=c+sqrt((a^2)+(a*xi/b)^2);
94 end
95

```

```
96 for j=1:q-1
97     w_id(j)=sqrt(((y_id(j+1)-y_id(j))^2)+((x_id(j+1)-x_id(j))^2)
98         );
99     w_tot_id=w_tot_id+w_id(j);
100 end
101 plot(x_id,y_id,'k','LineWidth', 2)
102 grid on
103 set(gca,'FontName','Arial','FontSize',16)
104
105 w_tot_id
106
107 y=yn;
108 f=y_id';
109
110 R2=rsquare(y,f);
111
112 R2
```